

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování

Návrh zařízení pro ruční svařování termoplastů  
Design of Equipment for Thermoplastics Manual Welding

Student:

Daniel Terber

Vedoucí práce:

doc. Dr.Ing. Ladislav Kovář

Ostrava 2012

## Zadání bakalářské práce

Student: **Daniel Terber**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2302R010 Konstrukce strojů a zařízení  
Specializace: 20 Výrobní stroje a zařízení  
Téma: **Návrh zařízení pro ruční svařování termoplastů**  
**Design of Equipment for Thermoplastics Manual Welding**

### Zásady pro vypracování:

Navrhněte zařízení pro ruční svařování auto a moto dílů vyrobených z termoplastů. Zařízení bude ovládané manuálně a bude umožňovat svařování různých typů termoplastů. Při návrhu vycházejte z níže uvedených zadaných parametrů.

### Zadané parametry:

Maximální tloušťka svařovaných dílů	5mm
Napájení	230V

### Proveďte:

- technickou zprávu s popisem funkce navrhovaného zařízení se všemi potřebnými výpočty,
- celkové projekční a detailní konstrukční řešení zařízení včetně výkresové dokumentace v rozsahu minimálně 1xA0.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
- ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
- LOYDA M., ŠPONER. V., ONDRÁČEK L.: *Svařování termoplastů*. Praha UNO 2001. 496 s. ISBN 80-238-6603-6
- VITÁSEK F. : *Ohřev materiálu 1 vyd.* Ostrava : Vysoká škola báňská, 1974 - 210 s.
- LENERT J.: *Pružnost a pevnost I. 1. vyd.* - Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1996 - 140 s.. ISBN 80-7078-392-3
- KOPÁČEK J. : *Pohony a převody 1. vyd.* Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2000, 211 s. ISBN 80-7078-806-2
- Firemní literatura, podklady apod.
- Literární rešerše zpracovaná v rámci Bakalářského projektu.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr.Ing. Ladislav Kovář**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

---

doc. Dr.Ing. Ladislav Kovář  
vedoucí katedry



---

prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 21.5.2012.....

Daniel Terber.....

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu на výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2012

Daniel Terber

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Daniel Terber

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Jezdkovice 71

747 55 Jezdkovice

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

TERBER, D. *Návrh zařízení pro ruční svařování termoplastů : bakalářská práce.* Ostrava : VŠB– Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2012, 83 s. Vedoucí práce: Kovář, L.

Práce se zabývá návrhem zařízení pro ruční svařování termoplastů, vhodného pro opravu poškozených auto-moto plastů. Důraz je kladen na kvalitu svaru, proto se zabývám extruzním přístrojem s výhřevem bez použití vzduchu. Tavení opravovaného plastového materiálu je zde zajištěno odporově vyhřívaným nosem připevněným ke svařovací botce.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

TERBER, D. *Design of Equipment for Thermoplastics Manual Welding : Bachelor Thesis.* Ostrava : VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2012, 83 p. Thesis head: Kovář, L.

Thesis deals with a design of equipment for thermoplastics manual welding which is applicable for repairing car's and bike's plastic parts. The quality of weld is important therefore I am dealing with extrusion device with airless heating. Melting of the repairing plastic material is done by electric heating element attached to the welding shoe.

## Seznam symbolů a značek

$C_0$	Statická únosnost ložiska	[N]
$D$	Průměr šneku	[m]
$F_a$	Axiální síla působící na poslední závit šneku v dopravní zóně	[N]
$G$	Modul pružnosti ve smyku	[Pa]
$I$	Proud v odporovém drátu	[A]
$J_p$	Polární moment setrvačnosti průřezu	[m <sup>4</sup> ]
$J_{p1}$	Polární moment setrvačnosti průřezu pro průměr hřídele $d_{dop}$	[m <sup>4</sup> ]
$J_{p2}$	Polární moment setrvačnosti průřezu pro průměr hřídele $d_s$	[m <sup>4</sup> ]
$J_{p3}$	Polární moment setrvačnosti průřezu pro průměr hřídele $d_d$	[m <sup>4</sup> ]
$L$	Činná délka šneku	[m]
$L_d$	Délka dávkovací části šneku	[m]
$L_{dop}$	Délka dopravní části šneku	[m]
$L_{dr}$	Délka odporového drátu	[m]
$L_k$	Délka kompresní části šneku	[m]
$L_t$	Délka trubičky vedoucí do botky	[m]
$L_z$	Délka plastifikačního šneku od vetknutí po konec dopravní zóny	[m]
$M_{K2}$	Potřebný krouticí moment pro druhou část výpočtového modelu	[Nm]
$M_{K,c}$	Celkový krouticí moment	[Nm]
$M_{KS}$	Nejvyšší moment, který přenesení bezpečnostní spojka	[Nm]
$P$	Výkon odporového drátu	[W]
$P_1$	Potřebný výkon pro první část výpočtového modelu	[W]
$P_2$	Potřebný výkon pro druhou část výpočtového modelu	[W]
$P_c$	Celkový výkon potřebný pro pohon šneku s uvažováním účinnosti pohonu	[W]
$P'_c$	Celkový výkon potřebný pro pohon šneku bez uvažování účinnosti pohonu	[W]

$Q$	Celkový objemový průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_1$	Výtlačný tok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_2$	Tlakový tok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_3$	Tok vřelí	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_4$	Otáčivý příčný tok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_d$	Dopravní výkon první části výpočtového modelu	$[kg \cdot hod^{-1}]$
$\dot{Q}$	Celkový tepelný výkon plastifikační jednotky	$[W]$
$\dot{Q}_{tt}$	Tepelný výkon topného tělíska	$[W]$
$Q_{vv}$	Objemový průtok vytlačených vrstviček ze svarové spáry	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$\dot{Q}'$	Tepelný tok nutný k ohřívání materiálu na požadovanou teplotu	$[W]$
$R$	Poloměr šneku	$[m]$
$\dot{R}$	Velikost odporu odporového drátu na jeden metr	$[\Omega/m]$
$R_{dr}$	Odpor odporového drátu	$[\Omega]$
$R_s$	Účinný poloměr šnekovnice	$[m]$
$Re_d$	Reynoldsovo číslo pro proudění taveniny v dávkovací zóně	$[-]$
$Re_{dop}$	Reynoldsovo číslo pro proudění taveniny v dopravní zóně	$[-]$
$Re_t$	Reynoldsovo číslo pro proudění taveniny v trubičce vedoucí do botky	$[-]$
$S_d$	Plocha mezikruží v dávkovací zóně šneku	$[m^2]$
$S_{dop}$	Plocha mezikruží v dopravní zóně šneku	$[m^2]$
$S_{sh}$	Plocha průřezu svarové housenky	$[m^2]$
$S_{sh5}$	Plocha průřezu svarové housenky u svařovaného dílu tloušťky 5mm	$[m^2]$
$S_t$	Plocha průřezu trubičky vedoucí do botky	$[m^2]$
$S_{ss5}$	Plocha průřezu svarové spáry pro tloušťku svaru 5mm	$[m^2]$
$\Delta T_1$	Rozdíl původní teploty základního materiálu (ABS) od požadované	$[^\circ C]$
$\Delta T_2$	Rozdíl teplot ABS na konci a začátku plastifikační jednotky	$[^\circ C]$
$U$	Napětí odporového drátu	$[V]$
$W_K$	Průřezový modul v krutu	$[m^3]$
$c_{pABS}$	Měrná tepelná kapacita ABS za stálého tlaku	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$



$d_1$	Vnitřní průměr izolace	[m]
$d_2$	Vnější průměr izolace	[m]
$d_3$	Vnější průměr ochranného krytu	[m]
$d_d$	Průměr hřídele šneku v dávkovací zóně	[m]
$d_{dop}$	Průměr hřídele šneku v dopravní zóně	[m]
$d_i$	Obecně průměr hřídele šneku	[m]
$d_s$	Střední průměr jádra šneku v kompresní zóně	[m]
$d_t$	Vnitřní průměr trubičky vedoucí do botky	[m]
$d_{v1}$	Průměr vnitřní strany vyhřívaného pouzdra	[m]
$d_{v2}$	Průměr vnější strany vyhřívaného pouzdra	[m]
$g$	Gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
$h_1$	Výška prvního konce potrubí pro Bernoulliho rovnici	[m]
$h_2$	Výška druhého konce potrubí pro Bernoulliho rovnici	[m]
$h_{cz}$	Celková ztrátová výška v trubičce vedoucí do botky	[m]
$h_d$	Hloubka šnekového profilu v dávkovací zóně	[m]
$h_{kzk}$	Ztrátová výška z místní ztráty kónickým zúžením v kompresní zóně	[m]
$h_{kzt}$	Ztrátová výška z místní ztráty kónickým zúžením v trubičce vedoucí do botky	[m]
$h_{os}$	Ztrátová výška z místní ztráty v ohybu trubičky	[m]
$h_{td}$	Ztrátová výška z tření v dávkovací zóně	[m]
$h_{tk}$	Ztrátová výška z tření v kompresní zóně	[m]
$h_{tt}$	Ztrátová výška z tření v trubičce vedoucí do botky	[m]
$l$	Vyhřívaná délka plastifikační jednotky	[m]
$\dot{m}$	Hmotnostní průtok ABS materiálu z plastifikační jednotky	$[kg \cdot s^{-1}]$
$\dot{m}_{vv}$	Hmotnostní průtok vytlačených vrstviček ze svarové spáry	$[kg \cdot s^{-1}]$
$n$	Maximální otáčky šneku	$[s^{-1}]$
$p_1$	Tlak na začátku trubičky vedoucí do botky	[Pa]
$p_2$	Tlak na konci trubičky vedoucí do botky	[Pa]

$p_c$	Celkový tlak nutný k překonání všech odporů a tření v druhé části výpočtového modelu	$[Pa]$
$p_{zd}$	Ztrátový tlak v dávkovací zóně	$[Pa]$
$p_{zk}$	Ztrátový tlak v kompresní zóně	$[Pa]$
$q$	Tepelné ztráty na jeden metr vyhřívaného pouzdra	$[W \cdot m^{-1}]$
$r$	Poloměr zakřivení tlakové zóny svařovací botky	$[m]$
$r_5$	Poloměr zakřivení tlakové zóny svařovací botky pro tloušťku svaru 5mm	$[m]$
$r_d$	Poloměr hřídele šneku v dávkovací zóně	$[m]$
$r_{dop}$	Poloměr hřídele šneku v dopravní zóně	$[m]$
$r_t$	Poloměr zaoblení kolena trubičky vedoucí do botky	$[m]$
$s$	Rozteč šneku	$[m]$
$t$	Vysunutí svařovacího nosu	$[m]$
$t_5$	Vysunutí svařovacího nosu pro tloušťku svaru 5mm	$[m]$
$t_2$	Teplota okolního prostředí	$[^{\circ}C]$
$t_{s1}$	Teplota vnitřní strany čedičové vlny	$[^{\circ}C]$
$t_{s2}$	Teplota mezi izolací a vnitřním povrchem ochranného krytu	$[^{\circ}C]$
$t_{s3}$	Teplota povrchu ochranného krytu	$[^{\circ}C]$
$t_{stř}$	Střední teplota čedičové vlny	$[^{\circ}C]$
$t_{v1}$	Teplota na vnitřní straně vyhřívaného pouzdra	$[^{\circ}C]$
$t_{v2}$	Teplota na vnější straně vyhřívaného pouzdra	$[^{\circ}C]$
$v_1$	Rychlost proudění taveniny v dávkovací zóně šneku	$[m \cdot s^{-1}]$
$v_2$	Rychlost proudění taveniny v trubičce vedoucí do botky	$[m \cdot s^{-1}]$
$v_{pb5}$	Maximální rychlost posuvu svařovací botky pro svařování dílu tloušťky 5mm	$[m \cdot s^{-1}]$
$v_{sr5}$	Maximální svařovací rychlost pro svařování dílu tloušťky 5mm	$[m \cdot s^{-1}]$
$w$	Měrný odpor proti pohybu	$[-]$
$\alpha$	Úhel stoupání šnekovnice	$[^{\circ}]$
$\alpha_p$	Součinitel přestupu tepla mezi ochranným krytem a okolním vzduchem	$[Wm^{-2}K^{-1}]$

$\alpha_{su5}$	Středový úhel kruhové úseče průřezu svarové housenky pro tloušťku svaru 5mm	[°]
$\delta$	Vůle mezi hřbetem závitu šnekovnice a vyhřívaným pouzdrem	[m]
$\delta_t$	Třecí úhel mezi materiálem a šnekovnicí	[°]
$\varepsilon$	Úhel sklonu šnekového dopravníku	[°]
$\eta_c$	Celková účinnost pohonu	[-]
$\eta_{\check{c}o}$	Účinnost čelního ozubeného soukolí	[-]
$\eta_L$	Účinnost ložiska	[-]
$\vartheta$	Kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$\lambda_d$	Součinitel tření v dávkovací zóně	[-]
$\lambda_{dop}$	Součinitel tření v mezikruží dopravní zóny	[-]
$\lambda_{\xi}$	Součinitel tepelné vodivosti čedičové vlny	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_o$	Součinitel tepelné vodivosti oceli	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_s$	Střední hodnota součinitele tření v kompresní zóně	[-]
$\lambda_t$	Součinitel tření v trubičce vedoucí do botky	[-]
$\mu$	Dynamická viskozita	[Pas]
$\mu_t$	Součinitel smykového tření za pohybu	[-]
$\xi_{kzk}$	Součinitel místní ztráty při kónickém zúžení v kompresní zóně	[-]
$\xi_{kzt}$	Součinitel místní ztráty při kónickém zúžení v trubičce vedoucí do botky	[-]
$\xi_{os}$	Součinitel místní ztráty na ohybu trubičky vedoucí do botky	[-]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[-]
$\rho_{ABS}$	Hustota ABS	[kg · m <sup>-3</sup> ]
$\tau_{DK}$	Dovolené napětí pro krut	[Pa]
$\varphi$	Úhel zkroucení hřídele plastifikačního šneku	[°]
$\varphi_d$	Dovolený úhel zkroucení	[°]
$\varphi_{dL}$	Přepočtený dovolený úhel zkroucení na délku zkrucované části plastifikačního šneku	[°]

## Pojmy

Extrudér .....	Vytlačovací zařízení
Mikrokontrolér.....	Jednočipový mikropočítač
Plastifikace.....	Uvedení hmoty do plastického stavu
Software.....	Počítačový program

## Zkratky

ABS.....	Akrylonitrilbutadienstyren
PA.....	Polyamid
PC.....	Polykarbonát
PE-HD.....	Polyethylen s vysokou hustotou
PE-LD.....	Polyethylen s nízkou hustotou
PMMA.....	Polymethylmethakrylát
PS.....	Polystyren
PVC.....	Polyvinylchlorid

## Obsah

Seznam symbolů a značek .....	7
<b>1 Úvod .....</b>	<b>15</b>
<b>2 Současný stav řešení .....</b>	<b>16</b>
2.1 Ruční svařování horkým plynem a přídavným materiálem .....	16
2.1.1 Ruční svařování horkým plynem (označení WF) .....	17
2.1.2 Svařování horkým plynem s rychlotryskou (označení WZ) .....	18
2.2 Svařování vytlačovací horkým plynem (označení WE) .....	20
2.3 Patentová rešerše .....	22
2.3.1 Vyjádření k nalezeným patentům .....	23
<b>3 Požadavkový list .....</b>	<b>24</b>
<b>4 Předběžný návrh zařízení .....</b>	<b>25</b>
4.1 Hrubá stavební struktura .....	26
<b>5 Návrh svařovací botky a zajištění ohřevu základního materiálu .....</b>	<b>28</b>
5.1 Vlastní návrh svařovací botky .....	29
<b>6 Návrh šnekové plastifikační jednotky .....</b>	<b>31</b>
6.1 Návrh šneku .....	37
6.1.1 Stanovení rozměrů šneku .....	37
6.1.2 Ověření funkčnosti šneku metodou konečných prvků .....	38
6.2 Určení výkonu plastifikační jednotky .....	47
6.2.1 Určení vytlačovacího výkonu extrudéru .....	47
6.2.2 Výpočet maximální rychlosti svařování .....	50
6.2.3 Výpočet maximální teoretické rychlosti posuvu svařovací botky .....	52
6.2.4 Určení tepelného výkonu plastifikační jednotky .....	54
6.3 Návrh vyhřívaného pouzdra .....	54
6.3.1 Volba tepelné a elektrické izolace .....	55
6.3.2 Volba odporového drátu a výpočet jeho teploty .....	58

6.4	Regulace ohřevu a otáček motoru .....	59
6.5	Návrh pohonu.....	61
6.5.1	Výpočet první části výpočtového modelu .....	61
6.5.2	Výpočet druhé části výpočtového modelu.....	62
6.5.3	Celkový výkon a krouticí moment.....	69
6.6	Volba pohonu .....	70
6.6.1	Motor .....	70
6.6.2	Spojka .....	70
6.6.3	Ložiska.....	73
6.6.4	Ozubená kola .....	74
7	<b>Úplná stavební struktura .....</b>	<b>75</b>
7.1	Údržba .....	76
8	<b>Závěr .....</b>	<b>77</b>
9	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>80</b>

# 1 Úvod

V této práci se zabývám problematikou oprav plastových dílů aut a motocyklů. Jedná se především o nárazníky aut a kapotáž motocyklů, což jsou při nehodách nejčastěji poškozované díly. Hodnota nových originálních dílů se nezdá pohybuje v hranici deseti tisíc korun, a proto jistě stojí za zvážení možnost jejich oprav, namísto výměny. Tyto díly jsou ve většině případů tvořeny z termoplastických hmot, které se dají snadno spojovat svařováním. Touto metodou se zabývá poměrně široká škála zahraničních výrobců, kteří však nabízejí zařízení na bázi horkovzdušného ohřívání, což přináší řadu nevýhod, projevujících se na snížené kvalitě spojení.

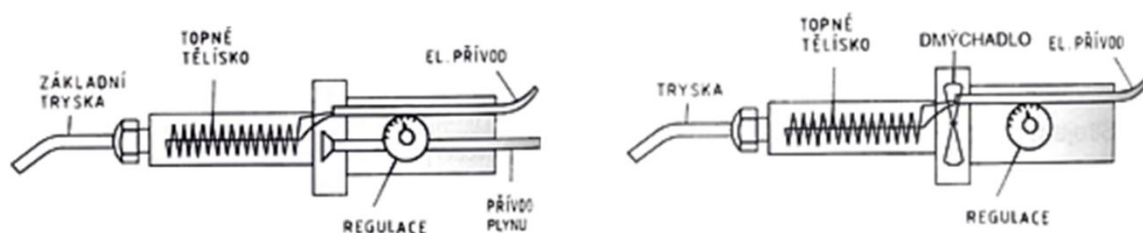
Cílem této práce je tedy navrhnout zařízení pro svařování plastů, které eliminuje nevýhody běžně dostupných zařízení určených pro tyto účely a skloubí výhody známých technologií svařování termoplastů.

## 2 Současný stav řešení

Při zjišťování současného stavu řešení, jsem použil zdroje zabývající se teorií a metodami svařování termoplastů a následně jsem vyhledal zařízení dostupná na trhu určená pro tyto metody. Dále jsem provedl patentovou rešerši.

### 2.1 Ruční svařování horkým plynem a přídavným materiálem

Horkovzdušné svařovací přístroje se vyrábějí ve dvou základních provedeních podle toho, zda v sobě obsahují vlastní dmýchadlo nebo jsou napojeny na externí přívod plynu (viz obr. 1.). Pro účely oprav plastů se používají většinou přístroje s vlastním dmýchadlem z důvodu mobility nebo nedostupnosti externího zdroje plynu. Jako ohřívaný plyn se používá vzduch nebo výjimečně inertní plyn. Přístroje jsou vybaveny plynulou regulací přívodu elektrického proudu a přívodu vzduchu [1,2,3].



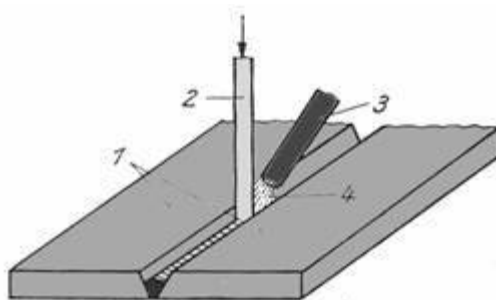
*Obr. 1. Vlevo svařovací přístroj s externím přívodem plynu, vpravo přístroj s vlastním dmýchadlem [1]*

Horkovzdušné svařovací přístroje je nutné vybavit svařovacími tryskami, které se dělí na svařovací a rychlosvařovací. Svařovací tryska je pouze zúžení pro výstup horkého plynu ze zařízení a slouží ke zmenšení tepelně ovlivněné oblasti. Používá se pro metodu WF (viz níže). Rychlosvařovací tryska slouží pro zefektivnění předchozí metody. Metoda svařování s tímto nástavcem se označuje WZ. Tyto nástavce se na zařízení buď zasunují (nasunovací trysky) nebo šroubují (závitové trysky) [1,2,3].



### 2.1.1 Ruční svařování horkým plynem (označení WF)

V místě svaru se obvykle ručním přístrojem vyfrézuje spára, do které se přiloží přídatný materiál ve formě tyčinky. Horkovzdušným přístrojem zahříváme základní i přídatný materiál na plastifikační teplotu, přičemž tlačíme tyčinku směrem do svarového spoje, čímž vyvíjíme tlak potřebný ke vzájemnému spojení materiálů. Jedná se o nejpoužívanější metodu oprav auto-moto plastů. Princip svařování metodou WF je znázorněn na obr. 2. [1,2,3].



*Obr. 2. Princip svařování metodou WF, 1 – základní materiál, 2 – přídatný materiál, 3 – tryska svařovací pistole, 4 – horký vzduch [2]*

Výhody [1,2,3]:

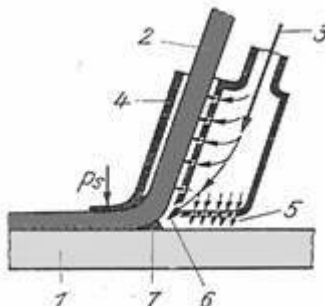
- jednoduché na obsluhu,
- dostupnost zařízení,
- jednoduchost zařízení,
- možnost použití více nástavců (včetně rychlosvařovacích trysek),

Nevýhody [1,2,3]:

- nedokonalé protavení přídatného materiálu,
- oxidace,
- velká tepelně ovlivněná oblast,
- nutnost frézování svarové spáry (obvykle nepřesné – od ruky),
- poměrně nízká kvalita svaru,

### 2.1.2 Svařování horkým plynem s rychlotryskou (označení WZ)

Tryska je navržena tak, aby v sobě vedla přídavný materiál ve formě tyčinek, který se přehřívá spolu se základním materiálem. Svařovací (přítlačná) síla vzniká na kluzné patce, která je umístěna na konci nástavce. Princip svařování metodou WF je znázorněn na obr. 3. [1,2,3].



Obr. 3. Princip svařování metodou WZ, 1 – základní materiál, 2 – přídavný materiál, 3 – přívod vzduchu, 4 – rychlosvařovací nástavec 5 – nahřívání základního materiálu, 6 – ohřev místa svaru, 7 – roztavený termoplast, ps – přitlačná síla [1]

Výhody [1]:

- stejné jako předchozí,
- vyšší rychlost oproti metodě WF,

Nevýhody[1,2,3]:

- stejné jako předchozí,
- nutnost použití různých nástavců pro různé průměry svařovacích drátů,
- při větších průřezech menší zbytková pnutí oproti WF,
- horší použití na těžko přístupných místech oproti WF,

**Příklad zařízení dostupného na trhu pro metody WF a WZ:**



*Obr. 4. Přístroj Leister Triac BT (zde se zúženou tryskou pro metodu WF) [4]*

**Parametry zařízení:**

*Tabulka 1: Technické parametry přístroje Leister Triac BT [4,5]*

Připojení na elektrickou síť [V]	230
Příkon [W]	1600
Nastavitelná teplota [°C]	20 – 700
Rozměry [mm]	340 x 90, rukojeť Ø 56
Svařovací výkon [ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ]	0,7
Hmotnost bez kabelu [kg]	1
Množství vzduchu [ $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	230
Aktuální cena [Kč]	Cca 12000

**Příklad dostupného nástavce pro metodu WZ:**



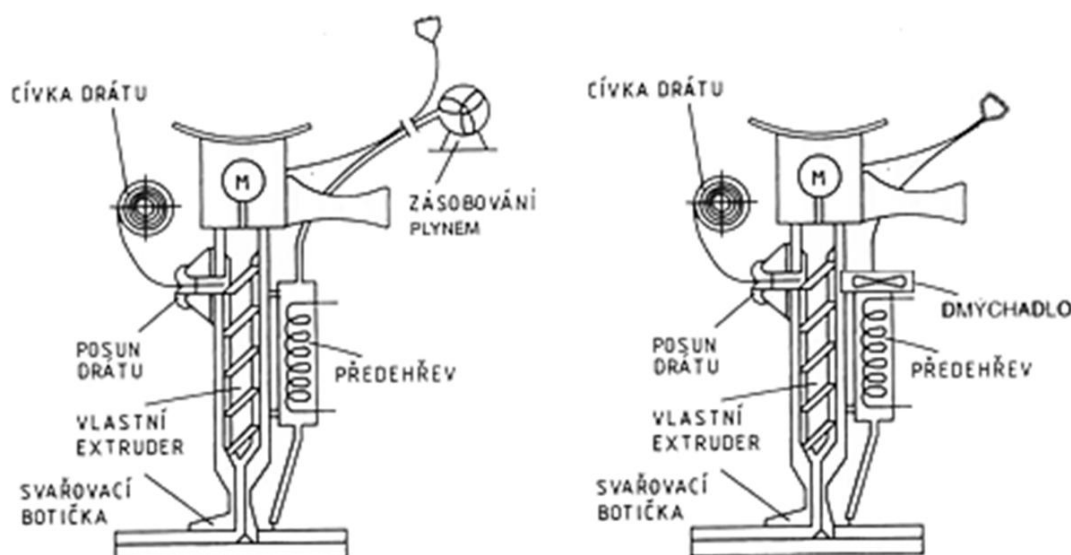
*Obr. 5. rychlosvařovací tryska [6]*

## 2.2 Svařování vytlačovací horkým plynem (označení WE)

Svařování pomocí extrudéru je podobné výše zmíněným technologiím. Základní materiál se předehtřívá horkým plynem nebo u strojového svařování světelným sáláním a poté se do něj z extrudéru vytlačí roztavený přídavný materiál, kterým je buď drát, nebo granulát. Ruční extrudéry používající jako přídavný materiál granulát nejsou na rozdíl od extrudéru používajících svařovací drát příliš rozšířené [2,3,7].

Vyvození potřebného svařovacího tlaku je zde realizováno pomocí speciálně tvarované svařovací botky [2,3,7].

Jedná se o nejrychlejší metodu (až 20x rychlejší oproti předchozí), která zároveň nabízí vyšší pevnost svarových spojů [2,3,7].



Obr. 6. Schéma extruzního přístroje. Vlevo bez vlastního dmychadla, vpravo s vlastním dmychadlem. [7]

Výhody [2,3,7]:

- velmi dobrá kvalita svaru (až 95% pevnosti základního materiálu),
- mnohonásobně vyšší svařovací rychlost oproti předchozím metodám,

Nevýhody [2,3,7]:

- velké rozměry a hmotnost,
- oxidace (neplatí při použití světelného sálání jako předehtřevu),
- velmi vysoká cena,
- špatná dostupnost v ČR,

### **Příklad zařízení dostupného na trhu pro metodu WE:**



*Obr. 7. Přístroj Wegener Exweld Mini [8]*

Jedná se o jeden z nejmenších extruzních přístrojů na trhu. Dodává se jak v provedení s vlastním předehřevem (Mini F-C), tak s externím (Mini C). Je určen pro svařování materiálů do tloušťky 10 mm. Řídicí jednotka je z důvodů hmotnosti umístěna mimo zařízení. Přístroj je určen výhradně pro svařovací dráty průměru 4 mm [8].

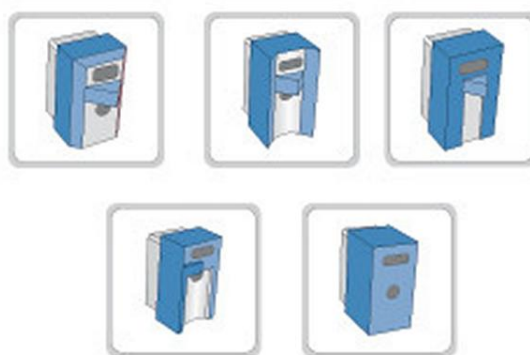
### **Parametry zařízení:**

*Tabulka 2: Technické parametry přístroje EXWELD Mini [8,9]*

	<b>EXWELD Mini C</b>	<b>EXWELD Mini F-C</b>
Připojení na elektrickou síť [V]	230	230
Vlastní předehřev	ne	ano
Výkon [W]	900	900
Topný výkon [W]	250	250 + 460 (předehřev)
Rozměry [mm]	410 x 260 x 60	410 x 270 x 60
Průměr svařovacího drátu [mm]	4	4

	EXWELD Mini C	EXWELD Mini F-C
Vytlačovací výkon [kg · hod <sup>-1</sup> ]	0,7	0,7
Hmotnost [kg]	2,5	2,9
Aktuální cena [€]	cca 2000	cca 2000

**Příklad dostupných nástavců pro metodu WE:**



*Obr. 8. Svařovací botky pro různé typy svarů [10]*

## 2.3 Patentová rešerše

V patentových databázích jsem vyhledával ruční zařízení sloužící ke svařování termoplastů bez použití horkého vzduchu.

Datum vypracování: 14. 3. 2012

Vyhledávání podle následujících třídníků:

B29C65/18, B29C65/22, B29C65/24, B29C65/02, B29C65/30, B29C65/12, B29C65/40

Klíčová slova: Ruční, termoplast, svářečka, vytlačování, odpor, extrudér,

Hand welder, car repair, hand held, extruder, extrusion, welding shoe, resistance welding, airless welder, airless welding, hand welding, nozzle, electric heat

Vyhledávání v online databázích:

- Úřad průmyslového vlastnictví [11]
- Espacenet [12]

#### **Úřad průmyslového vlastnictví**

B29C 65/18 ...41 záznamů, 0 podobných

B29C 65/22...4záznamy, 0 podobných

B29C 65/24...8 záznamů, 0 podobných

B29C 65/02...99 záznamů, 0 podobných

B29C 65/30...8 záznamů, 0 podobných

B29C 65/12...6 záznamů, 0 podobných

B29C 65/40...7 záznamů, 0 podobných

#### **Espacenet**

B29C 65/18...12607 záznamů, 0 podobných

B29C 65/22...1986 záznamů, 0 podobných

B29C 65/24...641 záznamů, 0 podobných

B29C 65/02...23654 záznamů, 0 podobných

B29C 65/30...855 záznamů, 0 podobných

B29C 65/12...599 záznamů, 0 podobné

B29C 65/40...3069 záznamů, 1 podobný patent (US19880172077)

### **2.3.1 Vyjádření k nalezeným patentům**

#### **Číslo přihlášky: US19880172077**

Jedná se o zařízení obsluhované jednou rukou, určené pro svařování termoplastů kondukcí. Zařízení neobsahuje extrudér a jako přídavný materiál používá plastový drát. Ohřev základního i přídavného materiálu obstarává odporově vyhřívaný hrot, který také vytváří v základním materiálu V-drážku. Vyhřívaný hrot neobsahuje vodící plochy. Svařovací drát se pouze nataví a nedochází k dokonalému promísení svařovaného a přídavného materiálu. Dávkování přídavného materiálu je přerušovaně ovládáno spouští pomocí mechanismu.

### 3 Požadavkový list

#### **Zařízení musí splňovat:**

- svařitelnost termoplastů tloušťky až 5 mm,
- svařování bez předpřipravení svařovací spáry,
- svařování a přidávání svařovacího materiálu jednou rukou,
- svařování bez použití horkého vzduchu,
- možnost regulace teploty pro svařování různých termoplastů,
- dobré protavení a promíchání základního materiálu s přídatným,

#### **Zařízení může splňovat:**

- konstantní podávání přídatného materiálu regulovatelné obsluhou,
- nenáročnost na obsluhu a údržbu,
- možnost provařitelnosti materiálu pouze z jedné strany,
- regulace svařovacího nástavce pro různé tloušťky svařovaných materiálů,
- možnost výměny svařovacích nástavců pro univerzální použití,
- dobrá ergonomie a malé rozměry,



## 4 Předběžný návrh zařízení

Do následující morfologické matice jsem shrnul základní funkce, které musí požadované zařízení vykonávat a funkční principy, které tyto funkce zajišťují.

Tabulka 3: Morfologická matice [13]

Dílčí funkce		Funkční principy		
		1	2	3
1	Pohon	<b>Stejnoseměrný motor + převodovka</b>	střídavý motor + převodovka	Ručně
2	Posuv přídavného materiálu ve formě granulátu	Dopravní šnek	<b>Plastifikační šnek</b>	
3	Zajištění ohřevu přídavného materiálu	Indukce	<b>Odporový drát</b>	
4	Způsob plastifikace	<b>Plastifikační jednotka</b>	Vyhřívání trubka	
5	Tavení základního materiálu	<b>Svařovací botka s odporově vyhříváním nosem</b>		
6	Regulace teplot	Kupovaný přístroj	<b>Přístroj na míru</b>	
7	Regulace posuvu	Ručně	<b>Potenciometr</b>	
8	Změna tloušťky svaru	<b>Nastavitelná výška vyhřívání nosu</b>		

## 4.1 Hrubá stavební struktura

Následující popis se týká návrhu hrubé stavební struktury zařízení, jehož náčrt je zobrazen na obr. 9. na následující straně.

Plastový granulát umístěný v zásobníku (1), je vsypáván přes závitový spoj (2) do plastifikační jednotky, tvořené třízónovým šnekem (3), který se skládá z dopravní, kompresní a dávkovací zóny. Šnek se otáčí v pouzdru (4), které je vyhříváno odporovým drátem (5). V tomto místě se granulát plastifikuje a homogenizuje. Takto zpracovaný materiál vstupuje do svařovací botky, která je k vývodu z plastifikační jednotky přišroubována převlečnou maticí (6). Tato matice je přišroubována k závitu pevně spojeném s tělískem botky (7). K tělísku je připojen vyhříváný nos (8), kterému posuvný mechanismus umožňuje pohyb ve vertikálním směru. Nos je vyhříván topnou patronou (9), která je v něm zasunutá.

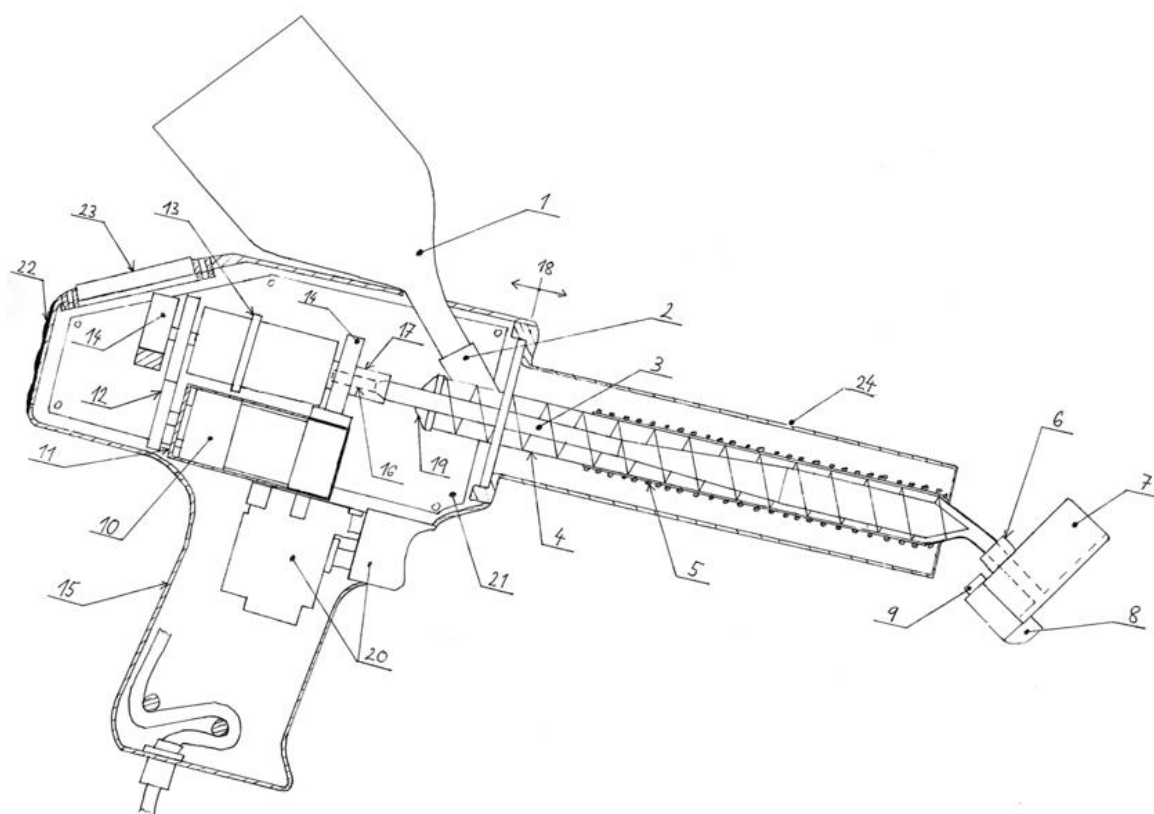
O otačení šneku se stará stejnosměrný motor s planetovou převodovkou (10), který je umístěn v rámu motoru (11). Přes čelní ozubené soukolí (12) otáčí bezpečnostní spojkou (13), která je umístěna ke dvěma ložiskovým domkům (14), připevněným k motorovému rámu (11) a rámu přístroje (15). Hřídel šneku je na konci v místě (16) tvarově upravena tak, aby přenášela moment na dutou hřídel (17), která vystupuje ze spojky (13). Toto spojení umožňuje axiální pohyb šneku směrem od spojky, což zajišťuje snadnou demontáž v případě údržby zařízení. Při demontáži se odšroubuje zásobník na granulát (1) a povolí spoj v místě (18). Pro vytáhnutí šneku (3) odšroubujeme víčko (19), které brání průniku drobných částí granulátu do prostoru pohonu šneku.

Otáčky motoru ovládáme spouští (20) s potenciometrem. Maximální otáčky jsou regulovány pro každý materiál a tloušťku svařovaného materiálu zvlášť, stejně jako teploty odporového vytápění šneku a nosu botky, které jsou na sobě nezávislé. O tuto regulaci se stará počítačový modul (21).

Potřebné hodnoty typu a tloušťky svařovaného materiálu zadáváme do počítačového modulu (20) fóliovými tlačítky (22). Hodnoty vybíráme na víceřádkovém LCD displeji (23).

Mezi ochranným krytem (24) a odporovým drátem (5) je tepelná izolace sloužící ke snížení emisí tepla do okolí a z bezpečnostních důvodů.

Na tomto náčrtu není pro lepší přehlednost znázorněno propojení jednotlivých elektrických komponent kabeláží.

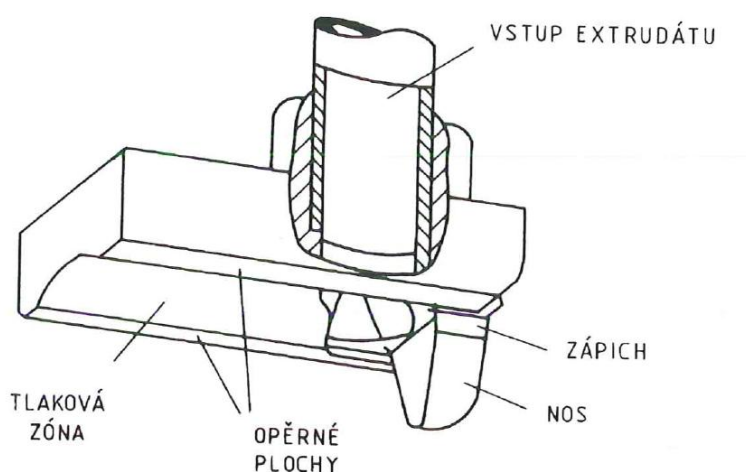


Obr. 9. Předběžný návrh zařízení

## 5 Návrh svařovací botky a zajištění ohřevu základního materiálu

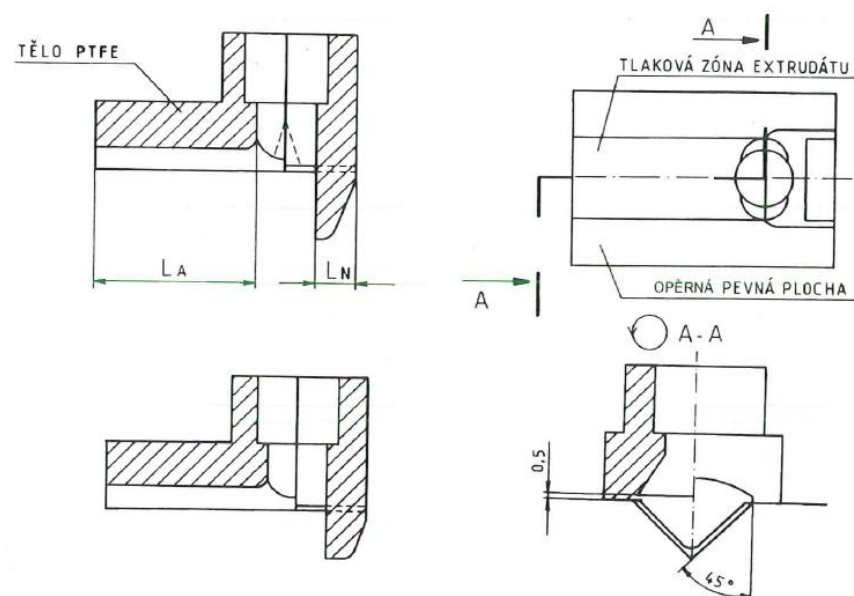
Svařovací botka je jedna z nejdůležitějších částí extruzního zařízení pro svařování termoplastů a na její geometrii závisí kvalita svaru. Pro různé typy svaru je třeba použít různé botky. Na následujícím obrázku si můžeme prohlédnout, z jakých částí se botka skládá. Nos slouží k vytvoření svařovací spáry a zabraňuje vytlačování taveniny před botku. K vyvození svařovacího tlaku složí tlaková zóna, jejíž délkou můžeme tlak ovlivnit. Kolem tlakové zóny jsou umístěny opěrné plochy, které kloužou po svařovaném povrchu a zabraňují vytlačování taveniny po stranách mimo svařovací spáru [2,3,7].

Botka se kvůli nepřilnavosti a malé tepelné vodivosti vyrábí z teflonu. Teflon má také vynikající chemickou odolnost a odolnost proti otěru. Tepelná stabilita teflonu se udává do 260 °C [14].



*Obr. 10. Perspektivní znázornění svařovací botky [3]*

Konstrukcí svařovací botky se zabývá směrnice DVS 2207 – díl 4, kde jsou uvedeny potřebné údaje. Některé údaje můžeme vyčíst i z následujícího obrázku a tabulky [3].



Obr. 11. Rozměry svařovací botky.  $L_A$ -délka přitlaku,  $L_N$ -délka nosu botičky [3]

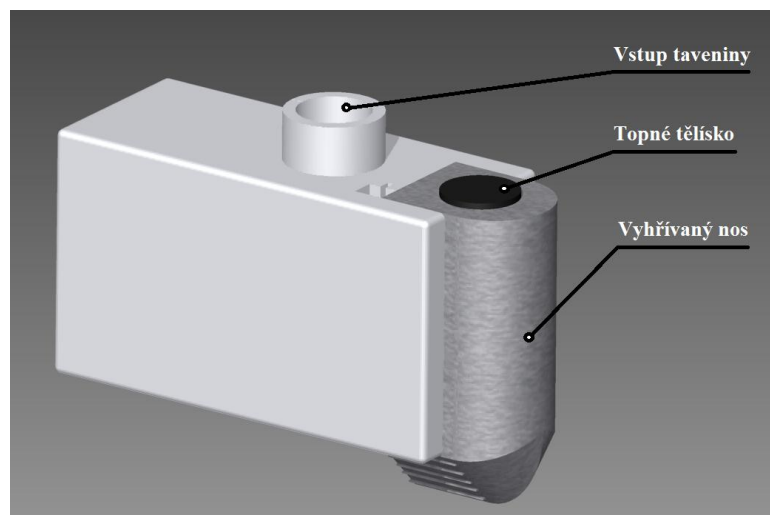
#### Tabulka s doporučenými rozměry svařovací botky:

Tabulka 4: Doporučené délky nosu botičky a délky přitlaku pro různé tloušťky svarů [3]

Tloušťka svaru [mm]	Délky $L_A$ a $L_N$ [mm]	
	$L_A$	$L_N$
Do 15	35	10
15÷20	45	15
20÷30	55	20

## 5.1 Vlastní návrh svařovací botky

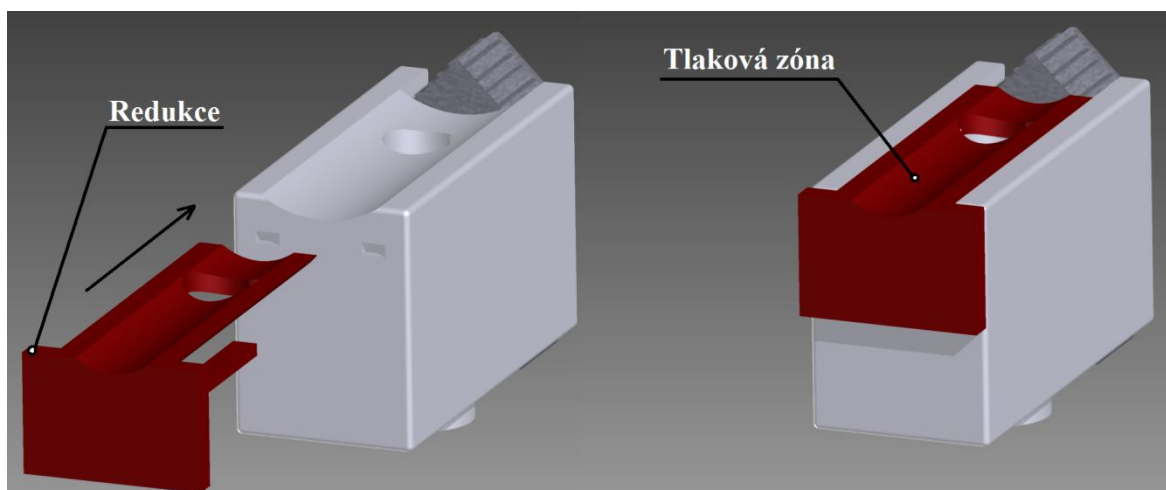
Abych splnil v této práci uvedené požadavky, musel jsem navrhnout několik změn, oproti běžně používaným svařovacím botkám. Jelikož mnou navrhované zařízení nebude obsahovat předeřev základního materiálu horkým vzduchem, použiji k tomuto účelu vyhřívaný nos, ve kterém bude umístěno topné tělísko. Nos bude na bocích opatřen drážkami, pro lepší promíchání základního a přídavného materiálu.



*Obr. 12. Svařovací botka bez redukce s úplně vysunutým nosem*

Kvůli výskytům různých tloušťek plastů na motocyklech a automobilech, navrhuji možnost regulovat vysunutí nosu botky v rozmezí 0 až 5 mm. Díky tomuto řešení není třeba při svařování různých tloušťek materiálů botku vyměňovat. Při změně hloubky svařovací spáry je však nutno změnit i tvar tlakové zóny, což jsem vyřešil odstupňovanými redukcemi, které se nasunou na původní botku. Na obr. 13. je vyhřívaný nos zasunut pro svařování tenčích materiálů. Potřebná změna tvaru tlakové zóny je vyřešena redukcí.

Pokud budeme svařovat jen z jedné strany, můžeme svařovat materiály o tloušťce 5 mm, v případě svařování z obou stran až 10 mm.



*Obr. 13. Svařovací botka s redukcí pro tenčí materiály*

## 6 Návrh šnekové plastifikační jednotky

Vytlačovací šnekové stroje jsou kontinuálně pracující zařízení, která vytlačují hmotu v plastickém stavu skrz tvarovací nástroj do volného prostoru. Tato zařízení jsou používána hlavně pro výrobu polotovarů nebo konečných výrobků, ale také pro svařování plastů [2].

Vytlačovací stroj se obecně skládá z těchto prvků [2]:

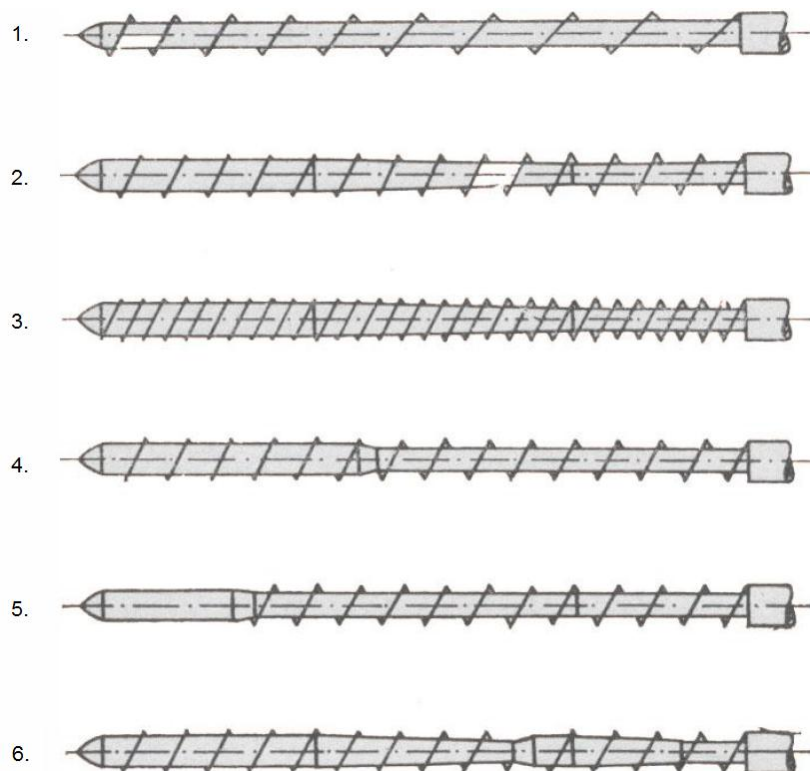
- zásobníku na granulát,
- vyhřívaného pouzdra šneku,
- plastifikačního šneku,
- vytlačovací hlavy,
- pohonu a řídicí jednotky,

Úkolem vytlačovacího stroje je dle [15] především zajistit:

- rovnoměrnou nepřetržitou dopravu taveniny bez pulzací,
- homogenizační účinek,
- vytlačování taveniny v zadaném teplotním rozmezí,
- vytlačení taveniny bez obsahu plynných těkavých látek,

Nejdůležitější částí plastifikační jednotky je šnek, jehož tvar a rozměry ovlivňují průběh plastifikačního procesu. Nejčastěji je tvořen třemi zónami. První zóna se nazývá dopravní a má za úkol dopravovat plastový granulát nebo prášek od násypky směrem k vytlačovací hlavě přes kompresní zónu. V kompresní zóně se materiál stlačí, plastifikuje a za stálého promíchávání vstupuje do dávkovací zóny, kde pokračuje homogenizace a ohřev materiálu. Po dosažení požadované teploty a homogenity vstupuje materiál pod tlakem kontinuálně do vytlačovací hlavy [2,15].

Doposud se nepodařil navrhnout šnek, který by byl použitelný pro všechny zpracovávané termoplasty, proto existuje celá řada provedení šneků [15].



*Obr. 14. Přehled základních provedení plastifikačních šneků [16]*

Popis obr. 1:

1. Šnek se zmenšujícím se úhlem stoupání závitu. Komprese je zde dosahováno plynulým zmenšováním úhlu stoupání, čímž se zmenšuje objem profilu šneku. Vhodný pro PVC. Obtížná výroba. Pro termoplasty se používá méně často [15,16].
2. Tří-zónový šnek s dlouhou kompresní zónou. Komprese je zde dosaženo zvětšováním průměru jádra šneku v kompresní zóně. Vhodný například pro ABS, PA, PMMA, PVC a další [2,16].
3. Dvouchodý šnek. Pro termoplasty se používá méně často [16].
4. Šnek s krátkou kompresní zónou a dlouhou dávkovací zónou. Používá se u nízko-viskózních tepelně stabilních plastů jako např. PP a PA [15,16].
5. Šnek ukončený hladkým torpédem. Hladké válcovité zakončení (torpédo) slouží pro zlepšení teplotní homogenity taveniny. Používá se pro vytlačování PS [15,16].
6. Odplyňovací šnek. Používají se pro odstranění těkavých podílů a vody z taveniny. Vhodné pro zpracování PMMA, PA, PC nebo ABS bez sušení [15,16].

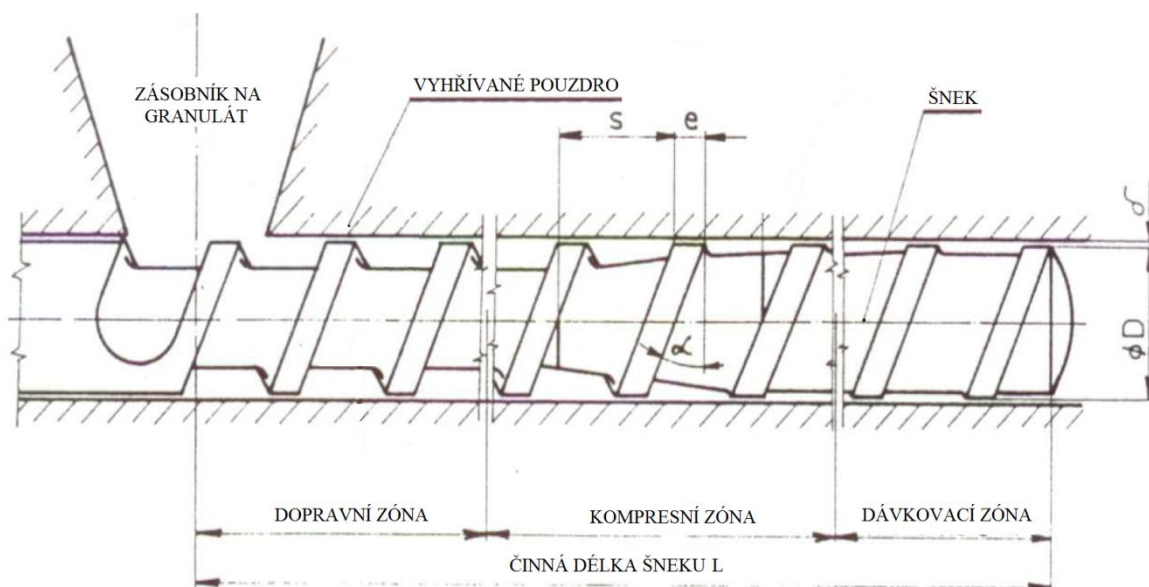


Velikost šneku je dána poměrem jeho účinné délky  $L$  a průměrem  $D$ . U konvenčních šnekových vytlačovacích strojů zpracovávajících termoplasty je tento poměr  $L/D$  obvykle 20÷30. U rychloběžných autogenních vytlačovacích strojů, které k plastifikaci materiálu používají tepla vzniklého třením mezi materiálem, šnekem a vnitřním povrchem pouzdra šneku, je tento poměr jen 10 ÷ 17 [2,15].

Dále je šnek charakterizován úhlem stoupání, který je nejběžněji  $\alpha = 17,7^\circ$ , což odpovídá stoupání závitů rovnému průměru šneku. Šířka hřbetu závitů bývá nejčastěji  $e=0,1D$  a vůle mezi hřbetem závitů a vyhřívaným pouzdem je  $\delta=0,002$  až  $0,005 D$  [2].

Neméně důležitou specifikací plastifikačního šneku je pak kompresní poměr, který je dán poměrem objemu šnekového profilu pod násypkou k objemu profilu na konci šneku. Tento poměr se pro granuláty termoplastů pohybuje podle zdroje [2] v rozmezí 1,8 až 4. Podle zdroje [15] pak v rozmezí 1,5 až 4. Změnou objemu profilu je dosaženo jednak kompenzace rozdílu měrné hmotnosti materiálu v dopravní zóně a měrné hmotnosti taveniny v dávkovací zóně, ale také zvýšení tlaku taveniny, což usnadňuje homogenizaci [2,15].

Na následujícím obrázku jsou vyznačeny výše zmíněné důležité rozměry včetně jednotlivých zón.

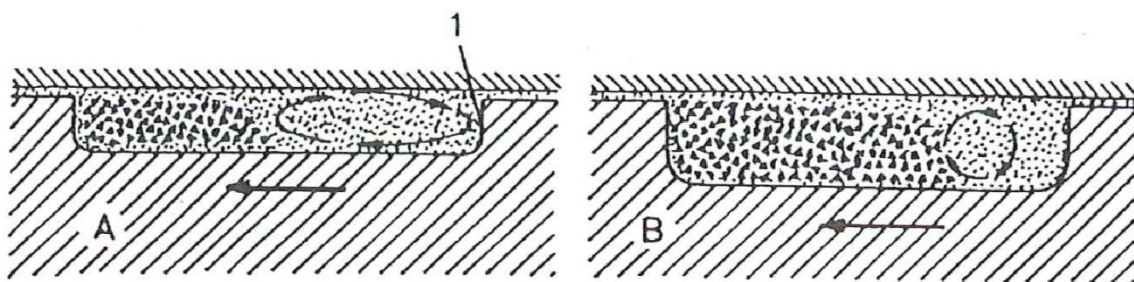


Obr. 15. Důležité rozměry plastifikačního šneku [17]

### **Děje v profilu šneku.**

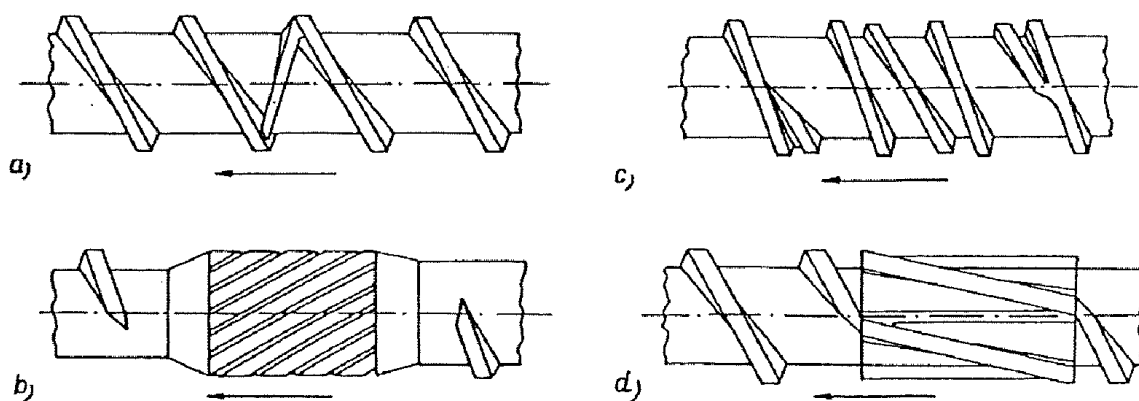
V dopravní zóně vytlačovacího stroje šnek odebírá ze zásobníku plast ve formě prášku nebo granulí a posunuje ho v axiálním směru k vytlačovací hlavě. Aby byl tento posun možný, musí být tření dopravovaného materiálu o vnitřní stranu pouzdra větší, než o povrch šneku. V takovém případě materiál po šneku klouže a díky tření o pouzdro se posunuje vpřed. Pro dosažení optimální dopravy materiálu bývá povrch šneku leštěn do vysokého lesku, zatímco vnitřní povrch pouzdra musí zůstat drsný, případně může být ve vstupní části pro zvýšení tření drážkovaný. Pouzdro šneku bývá často vytápěno pro každou zónu zvlášť, kdy nejvyšší teplota se nastavuje v dávkovací zóně a nejnižší teplota v zóně dopravní. Kdyby byla teplota kolem násypky příliš vysoká, mohlo by dojít k natavení vrstvičky plastu, která je v kontaktu s vnitřní plochou vyhřívaného pouzdra. Tím by se snížily třecí síly mezi materiálem a pouzdrem a došlo by k vytvoření zátky, která by se otáčela se šnekem a zamezila přístupu dalšího materiálu do kompresní části šneku. Proto bývá tato oblast, která přiléhá k násypce často chlazena [2,15,17].

Kompresní zóna je místem, kde se roztaví většina zpracovávaného termoplastu. Vzhledem ke zvětšujícímu se průměru jádra šneku dochází k tlačení granulátu popř. prášku na stěnu vyhřívaného pouzdra, čímž se jednak zvětšuje tření materiálu o pouzdro a šnek, ale také vzniká smykové namáhání materiálu. Tyto jevy způsobují vznik tepla, které u rychloběžných vytlačovacích strojů ( $250\div 1500\text{ min}^{-1}$ ) stačí k dokonalému protavení materiálu. Pouzdro šneku rychloběžného vytlačovacího stroje se vytápí pouze na začátku vytlačovacího procesu, kdežto u pomaluběžného stroje po celou dobu jeho provozu. Tavení hmoty u pomaluběžných strojů většinou začíná na vnitřním povrchu vyhřívaného pouzdra, kde se vytváří vrstvička roztaveného materiálu. Jakmile vrstvička zesílí natolik, že je větší než mezera mezi hřbetem závitů šneku a vyhřívaným pouzdrem, je setřena čelem závitů šneku. Roztavený materiál se začíná hromadit v zadní části šnekové drážky, kde víří v kruhovém pohybu vedle zatím neroztaveného materiálu, dokud se drážka úplně nezaplní taveninou. Skutečný proces tavení je ovlivňován řadou faktorů, jako je například hloubka drážky (viz obr. 16.), průměr šneku, adhezní poměry nebo druh plastifikovaného materiálu [2,15,17].



Obr. 16. Tavení granulátu v profilu šneku. A-mělký profil, B-hluboký profil, 1-čelo žebra šneku [15]

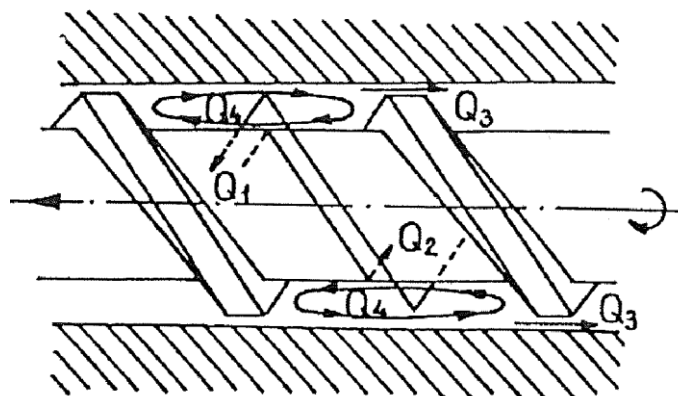
Nevýhoda jednošnekových vytlačovacích strojů může být neschopnost vytvořit naprosto homogenní taveninu. Uvnitř profilu můžou zůstat části materiálu, které nepřišly do styku s vyhřívaným povrchem pouzdra, čímž by došlo ke vzniku nepromíchaného pásma materiálu v drážce. Tento nedostatek se řeší kupříkladu mělkým profilem šneku (viz obr. 16.) nebo použitím některého z hnětacích elementů, jejichž úkolem je směs taveniny a tuhého materiálu dodatečně promíchávat [15].



Obr. 17. Příklad některých hnětacích elementů pro jednošnekové vytlačovací stroje [15]

Poslední částí šneku je vytlačovací zóna, kde je tavenina dále homogenizována a na konci vytlačována vytlačovací hlavou. I v této části je pohyb materiálu vpřed zajišťován rozdílným třením materiálu o povrch šneku a pouzdra. Jelikož se již jedná o taveninu, je tento pohyb nazýván výtlačným tokem  $Q_1$ . Proti tomuto toku však působí další dva toky, které snižují celkový dopravní výkon. Prvním z nich je tlakový tok  $Q_2$ , který vzniká kvůli zvyšování tlaku směrem k vytlačovací hlavě a proudí v drážce ve směru klesajícího tlaku, tedy proti výtlačnému toku. Druhý tok proudící proti výtlačnému toku je tok vůli  $Q_3$ . Tento tok vzniká díky vůli mezi hřbetem závitů šneku a povrchem pouzdra, přičemž tavenina opět proudí ve směru klesajícího tlaku. V drážce šneku se vytváří ještě čtvrtý tok,

tzv. otáčivý příčný tok  $Q_4$ , který rotuje kolmo na drážku a dále taveninu homogenizuje [15,16,17,18,19].

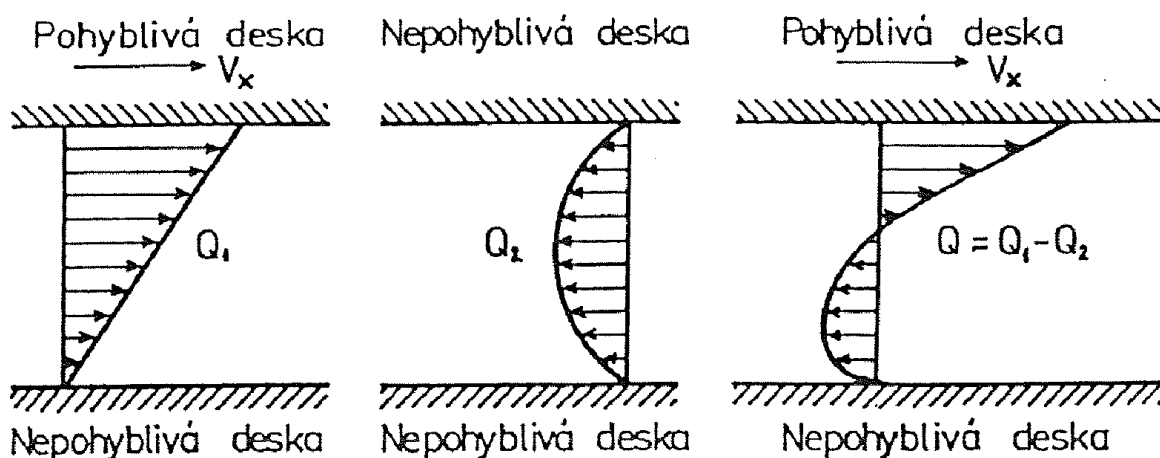


Obr. 18. Znáznornění jednotlivých toků v profilu šneku [15]

Celkový objemový průtok  $Q$  je pak dán vektorovým součtem všech toků ve směru drážky a otáčivý příčný tok se v něm tedy nijak neprojeví [15]. Výsledný objemový průtok pak můžeme vyjádřit jako:

$$Q = Q_1 - Q_2 - Q_3 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad [15] \quad (1)$$

Příčemž tok vůlí můžeme vzhledem k malým vůlím u nových strojů zanedbat. Pokud si chceme představit rychlostní profil výsledného toku, je dobré si reálnou situaci v dávkovací zóně nahradit dvoudeskovým modelem. Zde je drážka šneku rozvinuta do roviny a povrch vyhřívaného pouzdra je nahrazen deskou, která se po rozvinuté drážce pohybuje ve směru toku taveniny [15].



Obr. 19. Rychlostní profil výtlačného toku  $Q_1$ , tlakového toku  $Q_2$  a výsledného toku  $Q$  [15]

## 6.1 Návrh šneku

Rozměry šneku jsem navrhnul podle teoretických znalostí o vytlačovacích strojích popsaných na začátku kapitoly 6 a na základě požadavků na zařízení. Funkčnost plastifikační jednotky s navrženým šnekem jsem zkontroloval pomocí zjednodušeného výpočtového modelu metodou konečných prvků.

### 6.1.1 Stanovení rozměrů šneku

Při určování rozměrů šneku vycházím z požadavku na ovládání zařízení jednou rukou a požadavku na dobrou ergonomii zařízení. Délkový rozměr šneku ovlivňuje i celkovou délku zařízení. Pokud by byl šnek příliš dlouhý, zhoršilo by to ovladatelnost zařízení jednou rukou. Testováním zařízení podobného tvaru jsem zjistil, že vzdálenost od rukojeti přístroje ke konci nosu svařovací botky by neměla být větší než 200 mm. Při větší vzdálenosti by bylo ovládání zařízení jednou rukou obtížné. Tato hodnota je pro rozměr šneku omezující, protože při zachování alespoň spodní hranice doporučeného  $L/D$  poměru, by byl průměr šneku velmi malý. Šnek by měl malý vytlačovací výkon a bylo by obtížné ho vyrobit. Z tohoto důvodu volím menší poměr  $L/D$  než je doporučován. Snížení  $L/D$  poměru jsem kompenzoval menším úhlem stoupání, čímž jsem dosáhl zvýšení počtu závitů. Díky tomuto kroku zůstane materiál při stejných otáčkách šneku v plastifikační jednotce déle a bude mít více času na homogenizaci a prohřátí na požadovanou teplotu.

Tabulka 5: Navržené rozměry šneku

Činná délka šneku $L$ [mm]	205
Průměr šneku $D$ [mm]	15
Poměr $L/D$ [-]	13,7
Délka dopravní zóny $L_{\text{dop}}$ [mm]	95
Délka kompresní zóny $L_k$ [mm]	70
Délka dávkovací zóny $L_d$ [mm]	40

Úhel stoupání šneku $\alpha$ [°]	8,45
Rozteč šneku $s$ [mm]	7
Šířka hřbetu závitu $e$ [mm]	1,5
Mezera mezi hřbetem závitu a vyhřívaným pouzdrem $\delta$ [mm]	0,075
Počet závitů [-]	29
Kompresní poměr [-]	3

Abych ověřil funkčnost mnou navrženého šneku, vytvořil jsem teoretický model, který simuluje proces tavení v plastifikační jednotce. Tento model jsem analyzoval pomocí počítačového software ANSYS 13., který pracuje metodou konečných prvků.

### 6.1.2 Ověření funkčnosti šneku metodou konečných prvků

K ověření zvolených rozměrů plastifikačního šneku musím znát fyzikální vlastnosti přídatného materiálu. V tabulce 6 uvádím čtyři zástupce běžně používaných termoplastů.

Tabulka 6: Vlastnosti vybraných termoplastů [2,3,20,21,22,]

Plast	ABS	PP	PE-LD	PE-HD
Hustota $\rho$ [kg · m <sup>-3</sup> ]	1040-1070	902-906	910-925	941-965
Měrná tepelná kapacita za stálého tlaku $c_p$ [J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	1400	1700-2000	2000-2100	2300-2500
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	0,16-0,17	0,22	0,38-0,57	0,33-0,36
Přibližná teplota zesklenní [°C]	105	-	-	-

Plast	ABS	PP	PE-LD	PE-HD
Přibližná teplota tání [°C]	-	170	110	130
Doporučená teplota taveniny na konci šneku pro technologii vyfukování [°C]	210	235	145	185
Přibližná teplota rozkladu cca [°C]	284	315	318	275
Latentní teplo [J · kg <sup>-1</sup> ]	-	100500	116700	180000÷ 210000

Analýzu rozměrů šneku a všechny výpočty v této práci jsem provedl pro plast ABS. Z uvedených materiálů má nejmenší tepelnou vodivost a potřebuje pro ohřátí na požadovanou teplotu ze zmíněných termoplastů nejdelší čas, což na délku šneku a jiné počítané parametry klade největší nároky. Výpočty pro ostatní plasty by probíhaly stejně.

### Výpočtový model.

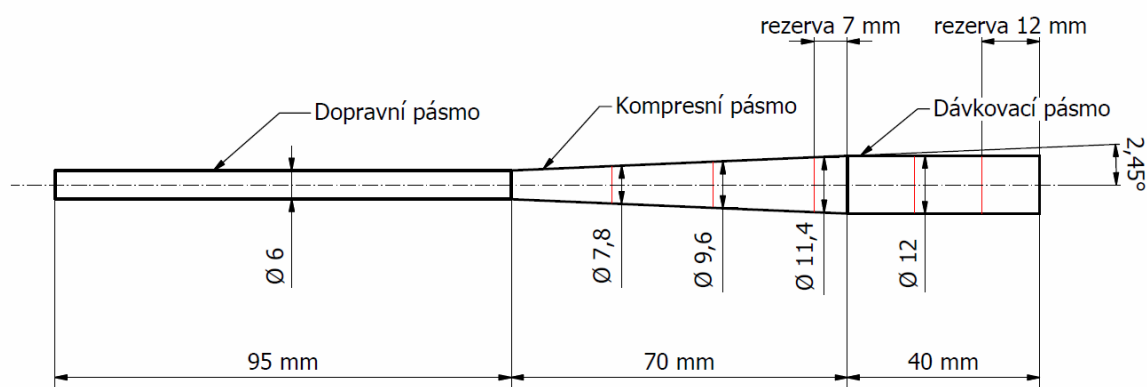
Materiál se ohřívá v mezikruží mezi hřídelí šneku a vyhřívaným pouzdrům, přičemž toto mezikruží zcela vyplňuje. Zjednodušeně tedy můžu dopravu přídavného materiálu v plastifikační jednotce uvažovat jako pohyb nekonečně mnoha mezikruží (nebo trubek nekonečně malých délek), tvořených přídavným materiálem, směrem od násypky po konec šneku. Vnitřní průměr těchto mezikruží se v kompresní zóně zvětšuje, protože se zvětšuje průměr hřídele šneku. Vnější průměr mezikruží zůstává stejný, následkem čehož dochází ke zhušťování přídavného materiálu. Tato mezikruží jsem řešil ve výpočtovém software ANSYS 13., celkem na 5-ti místech šneku. Jedná se o dvourozměrnou úlohu nestacionárního vedení tepla, výsledkem které bylo 5 analýz. Protože se přídavný materiál v plastifikační jednotce nejen dopravuje a ohřívá, ale také promíchává, uvažuji, že se přídavný materiál od jednoho počítaného místa po druhé promíchá právě jednou. Díky promíchávání se materiál homogenizuje a získává v celém mezikruží stejnou teplotu, která je vstupem do dalšího výpočtu. Jelikož míchací účinek směrem ke konci šneku roste, zvolil jsem, že promíchávání nastane každé tři otáčky v kompresní zóně a každé dvě otáčky

v dávkovací zóně šneku. Tato úvaha je zjednodušením dějů v drážce šneku. Ve skutečnosti se v drážce šneku může vedle sebe nacházet tavenina o vysoké teplotě a materiál v tuhém stavu.

Protože je materiál v dopravní a z větší části i v kompresní zóně plastifikační jednotky v tuhém stavu ve formě granulí nebo prášku, nachází se v jeho objemu určité množství vzduchu, což negativně ovlivňuje vedení tepla. Z tohoto důvodu a vzhledem k navrženému zjednodušení procesu promíchávání, navrhuji ve výpočtovém modelu jako kompenzaci teploty taveniny ABS na konci dávkovací zóny 210 °C. Tato hodnota je doporučená teplota taveniny ABS v hubici extrudéru pro technologii vyfukování. Pro technologii svařování však stačí na výstupu z extrudéru nižší teplota taveniny.

Aby do dávkovací zóny vstupoval plast již ve formě taveniny, navrhuji na konci kompresní zóny průměrnou teplotu granulátu vyšší než je teplota tání (popř. zesklnění) daného plastu. Pro ABS tedy alespoň 105 °C.

Jako další kompenzaci zmíněných zjednodušení navrhuji dosažení požadované teploty v kompresní zóně šneku 7 mm před jejím koncem. Jedná se o rezervu 10% z celkové délky kompresní zóny. Dosažení požadované teploty v dávkovací zóně pak navrhuji 12 mm před jejím koncem, což je rezerva 30% z její celkové délky.



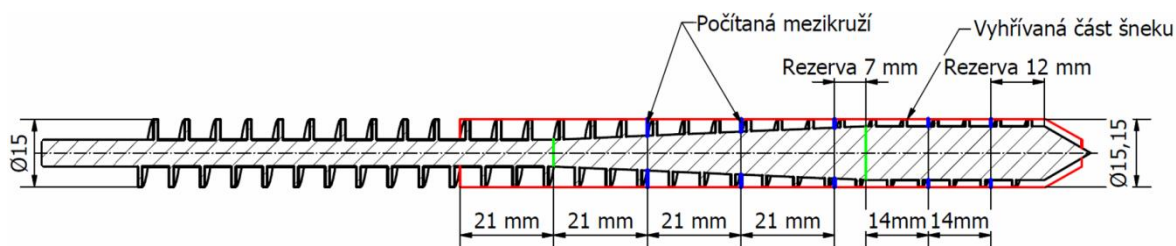
Obr. 20. Rozměry hřídele šneku s červeně vyznačenými místy uvažovaného promíchání

Teplotu na vnitřní straně vyhřívaného pouzdra volím pro ABS plast 250 °C a maximální otáčky šneku volím  $n=1 \text{ s}^{-1}$ .

Následující obrázek slouží k lepšímu pochopení počítaného modelu. Na řezu šnekem je červenou barvou znázorněna vnitřní část vyhřívaného šneku, která má teplotu 250 °C. Zeleně je oddělena dopravní, kompresní a dávkovací zóna plastifikační jednotky. Modře



jsou označena počítaná mezikruží, která znázorňují plastový materiál v oblastech jeho uvažovaného promíchání.



Obr. 21. Řez šnekem s modře vyznačenými místy promíchání

### Shrnutí zadání a požadavků potřebných pro výpočet.

Zadání:

- hustota ABS: 1050 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- tepelná vodivost ABS: 0,165 [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- měrná tepelná kapacita ABS: 1400 [ $\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- teplota zesklenní ABS: 105 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- teplota rozkladu ABS (rozložení 1% vazeb): 284 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- teplota na vnitřní stěně vyhřívaného pouzdra: 250 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- maximální rychlost otáčení šneku: 1 [ $\text{s}^{-1}$ ]
- vnitřní průměr vyhřívaného pouzdra: 15.15 [mm]
- množství promíchaného materiálu v drážce na jednu otáčku v kompresní zóně: 1/3 [-]
- množství promíchaného materiálu v drážce na jednu otáčku v dávkovací zóně: 1/2 [-]

Požadavky:

- Tavenina musí mít v 3. místě uvažovaného promíchání průměrnou teplotu alespoň  $105^{\circ}\text{C}$
- Tavenina musí mít průměrnou teplotu v 5. místě uvažovaného promíchání alespoň  $210^{\circ}\text{C}$

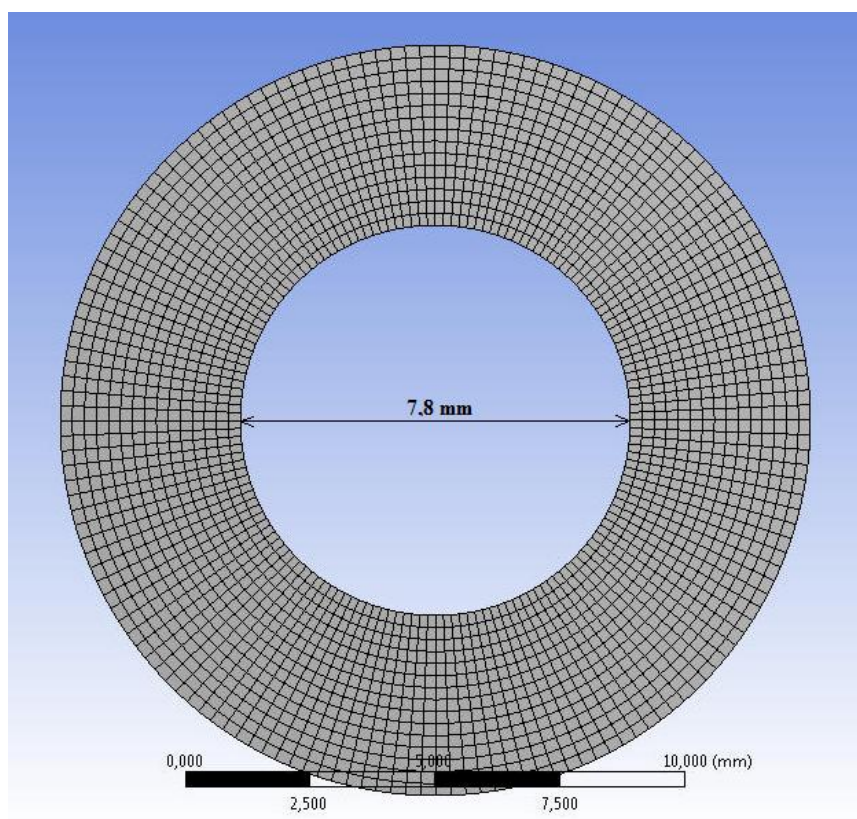
### Geometrický model pro software ANSYS 13.

Vzhledem ke zvětšujícímu se průměru hřídele šneku v kompresní části, bylo nutné vytvořit celkem čtyři různé výpočtové modely. Poslední dvě mezikruží jsou v dávkovací zóně a jejich vnitřní průměr se tedy nemění. Počty elementů a uzlů, na které software ANSYS 13 počítaná mezikruží rozdělil, jsou znázorněny v tabulce 7.

Tabulka 7: Počet elementů a uzlů výpočtových modelů

Průměr hřídele [mm]	7,8	9,6	11,4	12
Počet elementů	2340	944	590	472
Počet uzlů	2496	1062	708	590

Na následujícím obrázku je pro ilustraci ukázka vytvořené sítě u mezikruží v prvním místě uvažovaného promíchání.

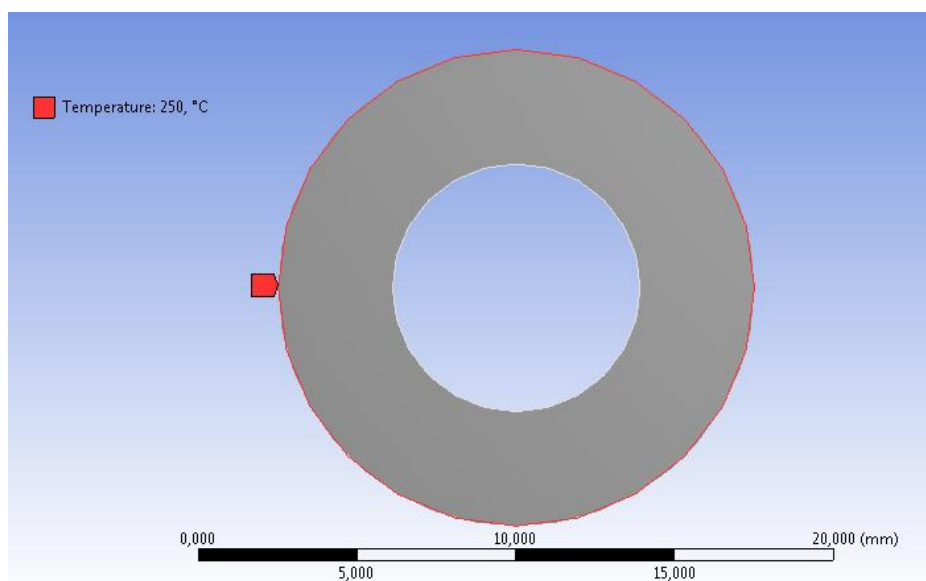


Obr. 22. Vytvořená síť v místě prvního uvažovaného promíchání

### Okrajové podmínky.

Na vnitřní straně vyhřívaného pouzdra je udržována konstantní teplota 250 °C, vzhledem k bezprostřednímu dotyku s materiálem uvažuji na jeho povrchu stejnou teplotu. Čelní plochy mezikruží a jeho vnitřní okraj jsou brány jako dokonale izolované. Tepelný vliv hřídele na ohřívání materiál tedy neuvažuji.

U prvního řešeného mezikruží počítám s počáteční teplotou granulátu 20 °C. Na počátku každého dalšího řešeného mezikruží zadávám jako vstupní teplotu průměrnou teplotu z předchozího výpočtu.



Obr. 23. Okrajové podmínky

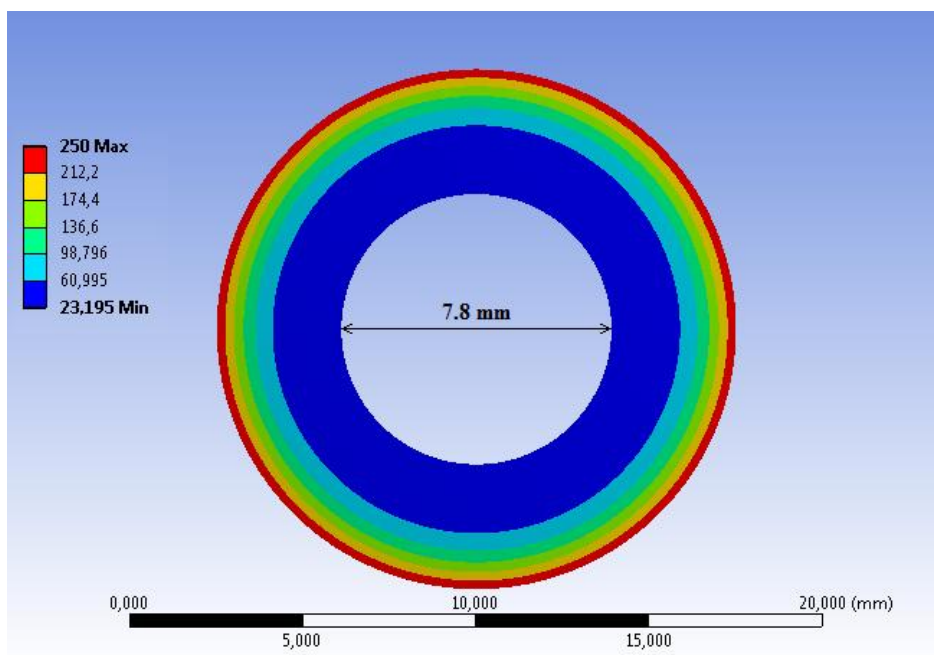
### Postup řešení.

Na následujících obrázcích je zachyceno vedení tepla plastovým materiálem v 5-ti uvažovaných místech promíchání. Každá úloha je brána jako nestacionární vedení tepla daným materiálem. Na počátku řešení (v čase 0s) má materiál rovnoměrnou teplotu dosazenou z průměrné teploty předchozího výpočtu a na koci řešení (v čase 3s pro kompresní a v čase 2s pro dávkovací zónu) je teplota nerovnoměrně klesající směrem ke středu mezikruží. Výjimku tvoří první řešení, kde počítám s předchozí teplotou 20 °C a vzhledem k tomu, že jsou i poslední tři závity šnekovnice v dopravní části vyhřívány, počítám s časem do prvního promíchání 6s.

Průměrné teploty pro vstup do dalšího výpočtu jsem počítal váženým průměrem ze spektra teplot v předchozím mezikruží.

### První uvažované promíchání.

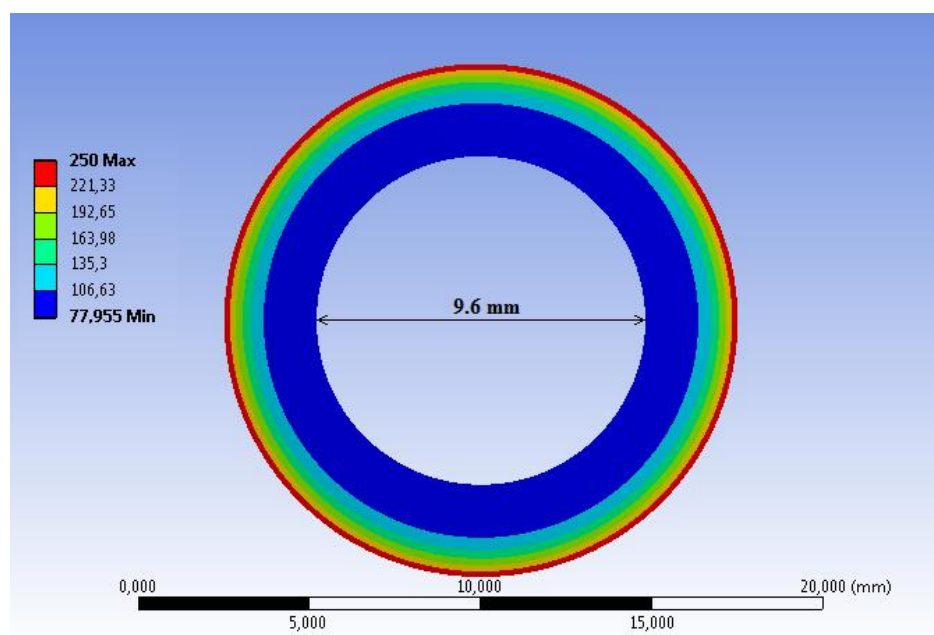
Po 6-ti vteřinách je dosaženo průměrné teploty 76 °C.



*Obr. 24. Místo prvního promíchání*

### Druhé uvažované promíchání.

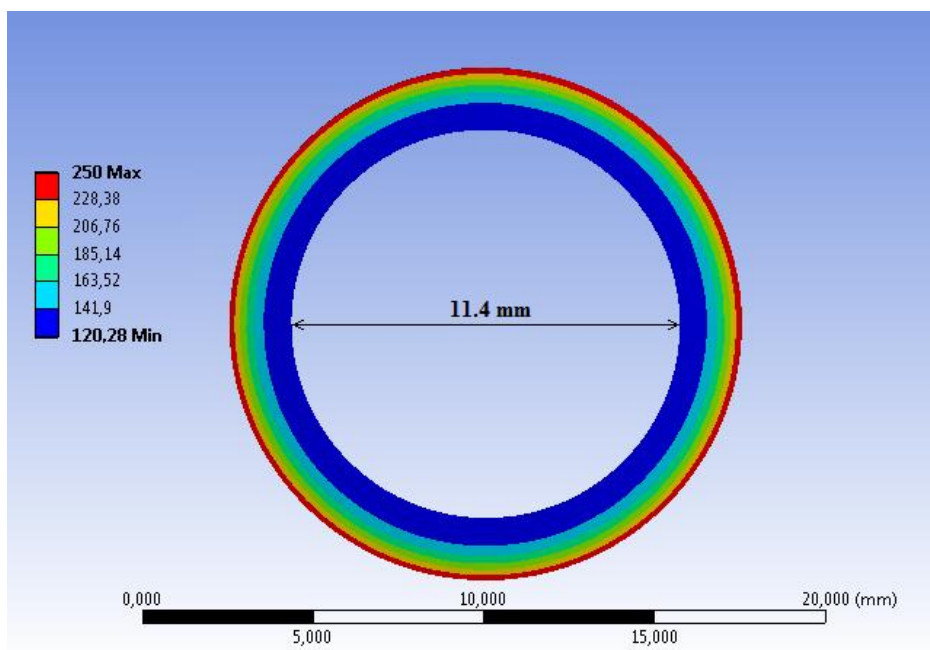
Po 9-ti vteřinách je dosaženo průměrné teploty 108 °C.



*Obr. 25. Místo druhého promíchání*

### Třetí uvažované promíchání.

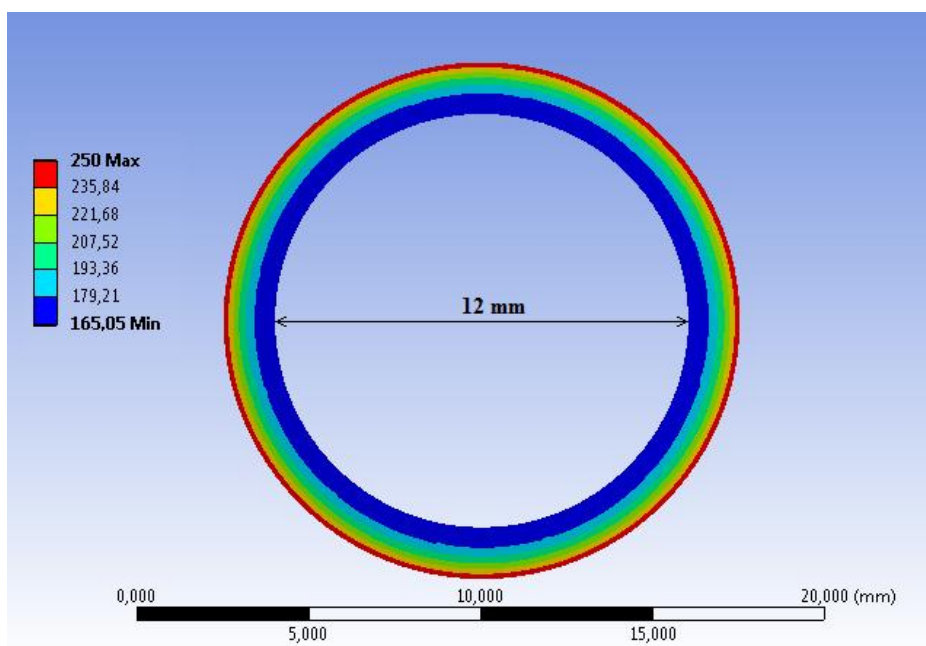
Po 12-ti vteřinách je dosaženo průměrné teploty 149 °C.



*Obr. 26. Místo třetího promíchání*

### Čtvrté uvažované promíchání.

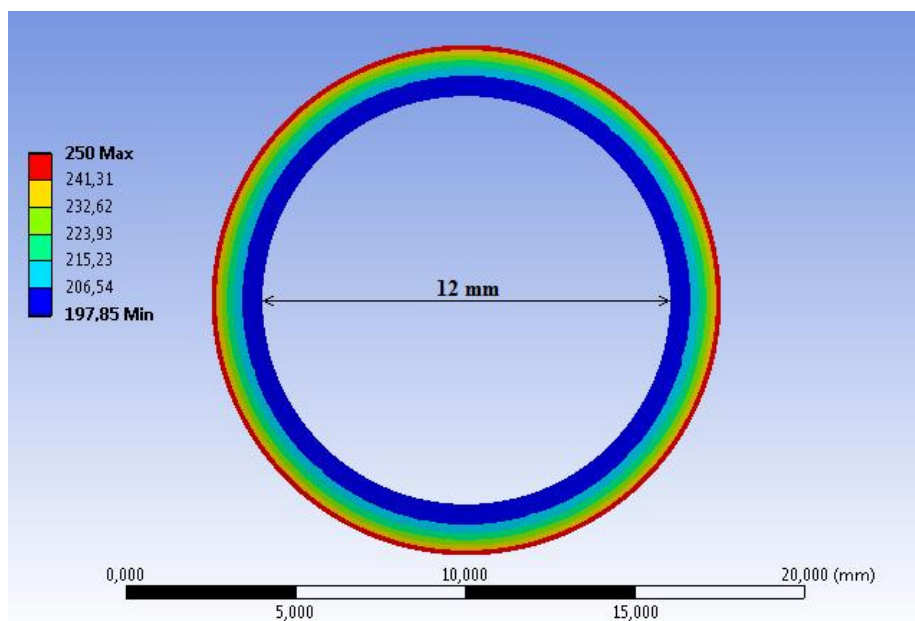
Po 14-ti vteřinách je dosaženo průměrné teploty 188 °C.



*Obr. 27. Místo čtvrtého promíchání*

### Páté uvažované promíchání.

Po 16-ti vteřinách je dosaženo průměrné teploty 213 °C.



Obr. 28. Místo pátého promíchání

### Závěrečné zhodnocení.

Z vypočtených průměrných teplot jsem zjistil, že ve třetím místě uvažovaného promíchání bylo dosaženo teploty 149 °C, což je hodnota, kdy by měl být materiál ABS uvnitř drážky šneku v tekutém stavu. V pátém místě uvažovaného promíchání bylo dosaženo teploty 213 °C, což také splňuje podmínky zadání. Kontrolované rozměry kompresní a dávkovací zóny tedy vyhovují.

Tabulka 8: Dosažené teploty podle pořadí promíchání

Pořadí promíchání	1	2	3	4	5
Průměr hřídele [mm]	7,8	9,6	11,4	12	12
Průměrné teploty [°C]	76	108	<b>149</b>	188	<b>213</b>

## 6.2 Určení výkonu plastifikační jednotky

V této podkapitole uvádím výpočet vytlačovacího výkonu plastifikační jednotky. Z tohoto výpočtu jsem určil i maximální svařovací rychlosti pro různé tloušťky svarů. Dále jsem ověřil maximální rychlost tavení základního materiálu svařovací botkou a určil jsem tepelný výkon potřebný k ohřívání přídavného materiálu.

### 6.2.1 Určení vytlačovacího výkonu extrudéru

Pro určení vytlačovacího výkonu extrudéru musím znát změnu tlaku taveniny v dávkovací zóně šneku během vytlačování. Jelikož jsou děje v plastifikační jednotce značně komplikované, určení přesného tlakového průběhu v dávkovací části šneku je na teoretické úrovni v podstatě nemožné.

Abych zjistil alespoň přibližnou změnu tlaku v dávkovací zóně šneku, opět jsem navrhnul teoretický model, který však přináší četné idealizace. V tomto modelu si musíme představit laminární proudění taveniny kolem jádra šneku (bez šnekovnice) ve vyhřívaném pouzdru plastifikační jednotky. Navržený model pak počítám jako proudění skutečné tekutiny potrubím (v tomto případě mezikružím). K tomuto výpočtu je nutné znát viskozitu proudící taveniny, ta se však na délce dávkovací zóny zmenšuje. V literatuře [23] je zobrazena viskozita v závislosti na teplotě pro plast ABS. Nejnižší teplota, u níž je v této literatuře viskozita znázorněna, má hodnotu 210 °C a této hodnotě odpovídá dynamická viskozita  $\mu = 260$  Pas. Jelikož jsem nenalezl materiály, kde by byla popsána viskozita taveniny ABS pro nižší teploty, počítám s hodnotou 260 Pas jako s průměrnou hodnotou viskozity taveniny v dávkovací části plastifikační jednotky.

Pro další výpočty budu potřebovat i kinematickou viskozitu. Přepočet dynamické viskozity na kinematickou je dán vztahem:

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho_{\text{ABS}}} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad [24] \quad (2)$$

$$\vartheta = \frac{260}{1070} = 0,243 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Kromě viskozity proudící taveniny musím znát i její rychlost. Jak už jsem uvedl v kapitole 6, celkový objemový průtok šneku je dán rozdílem tlakového toku a toku vůlí od výtlačného toku. Pokud kvůli malému vlivu na výsledek zanedbávám tok vůlí, taveninu

uvažuji jako newtonskou tekutinu a zatím neberu v úvahu tlakový tok, můžu rychlost získat z výtlačného toku  $Q_1$  :

$$Q_1 = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n \cdot h_d \cdot (\sin\alpha) \cdot (\cos\alpha)}{2} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad [18] \quad (3)$$

$$Q_1 = \frac{\pi^2 \cdot 0,015^2 \cdot 1 \cdot 0,0015 \cdot (\sin 8,45) \cdot (\cos 8,45)}{2} = 2,421 \cdot 10^{-7} m^3 \cdot s^{-1}$$

Kde  $h_d$  je hloubka šnekového profilu v dávkovací zóně  $D$  je průměr šneku,  $n$  jsou maximální otáčky šneku a  $\alpha$  je úhel stoupání šnekovnice.

Podělením výtlačného toku plochou mezikruží  $S_d$  v dávkovací zóně šneku získám rychlost proudění taveniny v této zóně.

$$v_1 = \frac{Q_1}{S_d} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (4)$$

$$v_1 = \frac{Q_1}{\pi \cdot (R^2 - r_d^2)}$$

$$v_1 = \frac{2,421 \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot (0,0075^2 - 0,006^2)} = 3,806 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1}$$

Kde  $R$  je poloměr šneku a  $r_d$  je poloměr hřídele v dávkovací zóně.

Když znám rychlost i viskozitu taveniny, můžu spočítat tlakovou ztrátu v dávkovací zóně plastifikační jednotky. Tlaková ztráta vzniká vzájemným třením částic proudící taveniny při rozdílných rychlostech a třením taveniny o plastifikační šnek a stěnu vyhřívaného pouzdra. Vyvolané tření způsobí ztrátovou výšku taveniny  $h_{zd}$ , ze které vypočítám tlakovou ztrátu  $p_{zd}$ .

*Reynoldsovo číslo pro mezikruží v dávkovací zóně:*

$$Re_d = \frac{v_1 \cdot (D - d_d)}{\eta} \quad [-] \quad [24] \quad (5)$$

$$Re_d = \frac{3,806 \cdot 10^{-3} \cdot (0,015 - 0,012)}{0,243} = 4,699 \cdot 10^{-5}$$

Kde  $d_d$  je průměr hřídele šneku v dávkovací zóně.



*Součinitel tření pro mezikruží v dávkovací zóně:*

$$\lambda_d = \frac{64}{Re_d} \cdot \frac{\left(1 - \frac{d_d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d_d}{D}\right)^2 + \frac{1 - \left(\frac{d_d}{D}\right)^2}{\ln \frac{d_d}{D}}} \quad [-] \quad [24] \quad (6)$$

$$\lambda_d = \frac{64}{4,699 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,012}{0,015}\right)^2}{1 + \left(\frac{0,012}{0,015}\right)^2 + \frac{1 - \left(\frac{0,012}{0,015}\right)^2}{\ln \frac{0,012}{0,015}}} = 2041296,838$$

*Ztrátová výška pro mezikruží v dávkovací zóně:*

$$h_{td} = \frac{\lambda_d \cdot L_d}{(D - d_d)} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad [24] \quad (7)$$

$$h_{td} = \frac{2041296,838 \cdot 0,04}{(0,015 - 0,012)} \cdot \frac{(3,806 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9,81} = 20,095m$$

Kde  $L_d$  je délka dávkovací zóny.

*Ztrátový tlak v dávkovací zóně:*

$$p_{zd} = g \cdot \rho_{ABS} \cdot h_{td} \quad [Pa] \quad [24] \quad (8)$$

$$p_{zd} = 9,81 \cdot 1070 \cdot 20,095 = 210931,187 \text{ Pa}$$

Z vypočítané změny tlaku dokážu určit tlakový tok  $Q_2$  v plastifikační jednotce. Odečtením tlakového toku od dříve vypočteného výtlačného toku  $Q_1$  získám výsledný objemový průtok  $Q$ .

$$Q = Q_1 - Q_2 \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad [18] \quad (9)$$

$$Q = Q_1 - \frac{\pi \cdot D \cdot h_d^3 \cdot p_{zd} \cdot (\sin \alpha)^2}{12 \cdot \mu \cdot L_d}$$

$$Q = 2,421 \cdot 10^{-7} - \frac{\pi \cdot 0,015 \cdot 0,0015^3 \cdot 210931,187 \cdot (\sin 8,45)^2}{12 \cdot 260 \cdot 0,04}$$

$$Q = 2,363 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

*Hmotnostní průtok:*

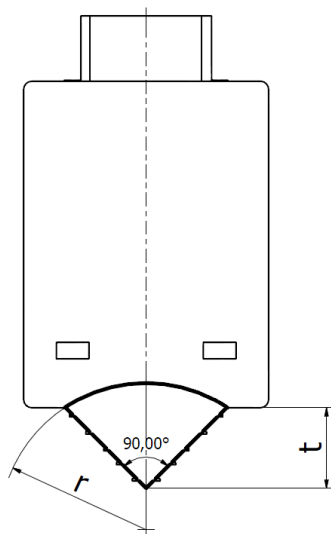
$$\dot{m} = Q \cdot \rho_{\text{ABS}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

$$\dot{m} = 2,363 \cdot 10^{-7} \cdot 1070 = 2,528 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m} = 0,910 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$$

## 6.2.2 Výpočet maximální rychlosti svařování

Ze zjištěného výsledného objemového průtoku, což je vlastně vytlačovací výkon extrudéru, vypočítám maximální svařovací rychlosti pro jednotlivé tloušťky svarů. Svařovací rychlosti získám jako podíl objemového průtoku a plochy průřezu vytlačené housenky pro danou tloušťku svaru. Plocha průřezu vytlačené housenky je dána vysunutím svařovacího nosu a poloměrem tlakové zóny. Na obr. 29. je zobrazen pohled zezadu na svařovací botku se silně vyznačeným obrysem svarové housenky, který je tvořen vysunutou částí svařovacího nosu a tvarem tlakové zóny. Vysunutí nosu je na obrázku označeno jako **t** a zakřivení tlakové zóny je charakterizováno poloměrem kruhové úseče **r**.



*Obr. 29. Pohled zezadu na svařovací botku s vyznačeným tvarem svarové housenky*

Poloměr kruhové úseče volím jako  $1,8 \cdot t$ , kde  $t$  označuje vysunutí nosu a tedy i tloušťku svaru. V tabulce 9 jsou uvedeny poloměry kruhových úsečí a plochy průřezů svarových housenek v závislosti na tloušťce svaru.

Plochu průřezu svarových housenek  $S_{sh}$  počítám jako obsah kruhové úseče a obsah pravoúhlého trojúhelníku o výšce  $t$ .

*Obsah průřezu svarové housenky pro tloušťku svaru 5 mm:*

$$S_{sh5} = t_5^2 + \frac{r_5^2}{2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot \alpha_{su5}}{180} - \sin \alpha_{su5} \right) \quad [m^2] \quad (11)$$

$$S_{sh5} = 0,005^2 + \frac{0,009^2}{2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 67,5}{180} - \sin 67,5 \right) = 3,530 \cdot 10^{-5} m^2$$

Kde  $\alpha_{su5}$  je středový úhel kruhové úseče průřezu svarové housenky pro tloušťku svaru 5mm.

*Maximální svařovací rychlost pro tloušťku svaru 5 mm:*

$$v_{sr5} = \frac{Q}{S_{sh5}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (12)$$

$$v_{sr5} = \frac{2,363 \cdot 10^{-7}}{3,530 \cdot 10^{-5}} = 6,695 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1}$$

V následující tabulce jsem rozepsal vypočítané rychlosti svařování pro dané tloušťky svařovaných dílů.

*Tabulka 9: Maximální rychlosti svařování a hodnoty pro jejich výpočet*

Tloušťka svařovaného dílu $t$ [mm]	1	2	3	4	5
Poloměr kruhové úseče $r$ [mm]	1,8	3,6	5,4	7,2	9
Plocha průřezu svarové housenky [mm <sup>2</sup> ]	1,412	5,647	12,706	22,589	35,295
Maximální rychlost svařování [mm·s <sup>-1</sup> ]	167,4	41,8	18,6	10,5	6,7

### 6.2.3 Výpočet maximální teoretické rychlosti posuvu svařovací botky

Rychlost svařování je omezena nejen výkonem plastifikační jednotky ale i výkonem topného tělíska ve svařovacím nosu. Topné tělísko je umístěno ve vyvrtaném otvoru uvnitř nosu a předává svůj tepelný výkon té části, která vytváří svařovací spáru ve svařovaném materiálu. Ostatní části nosu jsou tepelně izolovány. Část nosu, která vytváří svařovací spáru ve svařovaném materiálu je zahřátá vysoko nad teplotu tání daného plastu. Pokud přiložíme svařovací nos, k plastovému materiálu, vrstvička materiálu, která se bezprostředně dotýká nosu, se okamžitě roztaví. Vedení tepla plastovým materiálem je však kvůli jeho malé tepelné vodivosti velmi omezeno. Při pohybu svařovacího nosu během svařování je zmíněná vrstvička roztaveného materiálu nosem vytlačena a dochází k bezprostřednímu dotyku nosu s další vrstvičkou materiálu, která se ihned roztaví. Takto to pokračuje během celého procesu svařování. Protože je svařovací nos vytlačovanými vrstvičkami plastového materiálu intenzivně ochlazován, tak ve výpočtu předpokládám, že všechno teplo, které topné tělísko předá svařovacímu nosu, přejde na tyto vytlačované vrstvičky. Z tohoto předpokladu je možné zjistit hmotnost plastového materiálu tvořícího svarovou spáru, který se za sekundu nahřeje na požadovanou teplotu. Z tohoto hmotnostního průtoku se následně vypočítá maximální možná rychlost posuvu svařovací botičky.

K výpočtu je potřeba znát výkon topného tělíska. Topné tělísko volím značky OMEGA série CIR vysokých výkonů s následujícími parametry:

*Tabulka 10: Parametry zvoleného topného tělíska [25]*

Průměr topného tělíska [mm]	6,35
Délka [mm]	32
Výkon [W]	225

Do svařovacího nosu potřebuji topné tělísko o délce 20 mm. Protože výrobce nemá takový rozměr v nabídce, přepočtl jsem výkon tělíska o délce 32 mm na mnou požadovanou velikost. V následujících výpočtech tedy počítám s výkonem topného tělíska 140 W namísto uvedených 225 W.



Obr. 30. Ilustrační obrázek topného tělíska jiných rozměrů [25]

*Hmotnostní průtok vytlačených vrstviček ze svarové spáry:*

$$\dot{m}_{vv} = \frac{\dot{Q}_{tt}}{c_{pABS} \cdot \Delta T_1} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (13)$$

$$\dot{m}_{vv} = \frac{140}{1400 \cdot (250 - 20)} = 4,348 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Kde  $\dot{Q}_{tt}$  je topný výkon tělíska a  $\Delta T_1$  je rozdíl počáteční od konečné teploty základního materiálu.

*Přepočet hmotnostního průtoku na objemový:*

$$Q_{vv} = \frac{\dot{m}_{vv}}{\rho_{ABS}} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (14)$$

$$Q_{vv} = \frac{4,348 \cdot 10^{-4}}{1070} = 4,063 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

*Výpočet maximální teoretické rychlosti pohybu botky při tloušťce svaru 5mm:*

$$v_{pb5} = \frac{Q_{vv}}{S_{ss5}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (15)$$

$$v_{pb5} = \frac{Q_{vv}}{t^2} = \frac{4,063 \cdot 10^{-7}}{0,005^2} = 16,254 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Kde  $S_{ss}$  je plocha průřezu svarové spáry.

Tabulka 11: Maximální rychlosti posuvu svařovací botky v závislosti na tloušťce svaru

Tloušťka svařovaného dílu $t$ [mm]	1	2	3	4	5
Plocha průřezu svarové spáry $S_{ss}$ [mm <sup>2</sup> ]	1	4	9	16	25
Maximální rychlost posuvu botky $v_{pb}$ [mm·s <sup>-1</sup> ]	406	102	45	25	16

Z vypočtených hodnot je patrné, že svařovací rychlost není omezena rychlostí posuvu svařovací botky, ale výtlačným výkonem plastifikační jednotky.

### 6.2.4 Určení tepelného výkonu plastifikační jednotky

Tepelný tok potřebný k ohřívání přídavného materiálu (ABS) o hmotnostním průtoku  $\dot{m}$ , měrné kapacitě  $c_{pABS}$  a rozdílu teplot  $\Delta T_2$  zjistím ze vztahu:

$$\dot{Q}' = \dot{m} \cdot c_{pABS} \cdot \Delta T_2 \quad [W] \quad (16)$$

$$\dot{Q}' = 2,528 \cdot 10^{-4} \cdot 1400 \cdot (210 - 20) = 67,245 \text{ W}$$

Měrná tepelná kapacita se s teplotou mění. Jelikož jsem nenalezl literaturu se závislostí měrné tepelné kapacity ABS na teplotě, dosadil jsem za ni hodnotu měrné tepelné kapacity za stálého tlaku z literatury [3].

## 6.3 Návrh vyhřívání pouzdra

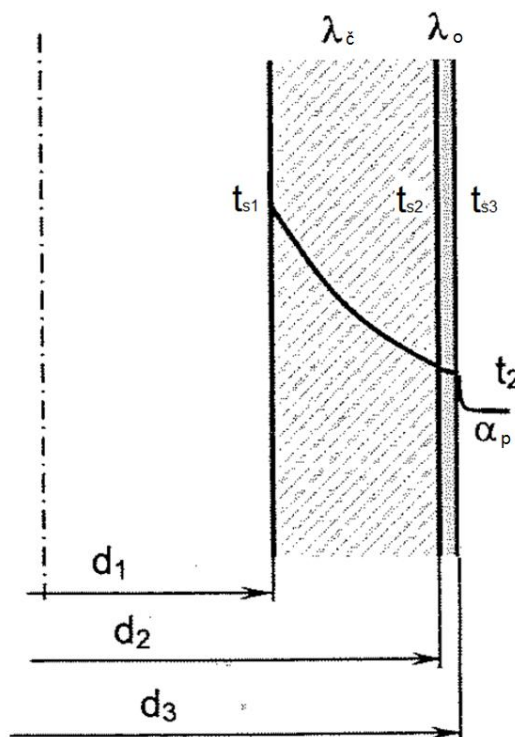
Na pouzdře je navinut odporový drát, kterým je vyhříváno. Elektrickou izolaci mezi odporovým drátem a vyhříváním pouzdrem zajišťuje slídový papír. Jako materiál pouzdra volím ocel. Protože je ocel dobře tepelně vodivá, je potřeba pouzdro tepelně oddělit tak, aby teplota v dopravní zóně pod násypkou nepřekročila teplotu tavení granulátu, čímž by mohlo dojít k přilepení taveniny ke šneku a vytvoření zátky. Tepelné oddělení zároveň slouží k tomu, aby se teplo vedením nedostalo do těla zařízení, kde by vysoká teplota mohla poškodit ložiska a elektrické součásti.

Tabulka 12: Parametry vyhřívání pouzdra

Tloušťka stěny [mm]	0,5
Vnitřní poloměr [mm]	15,15
Vnější poloměr [mm]	16,15
Vyhřívání délka činné části šneku [mm]	131

### 6.3.1 Volba tepelné a elektrické izolace

Tepelná izolace vyplňuje místo mezi vyhříváním pouzdrem a ochranným krytem. Jako tepelnou izolaci volím čedičovou vlnu, která má podle literatury [26] součinitel tepelné vodivosti  $\lambda_{\varepsilon} = 0,035 + 0,00014 \cdot t_{stř}$ . Teplotu na vnitřní straně tepelné izolace zaokrouhluji na  $t_{s1} = 250\text{ °C}$ . Součinitel přestupu tepla mezi ochranným krytem a okolním vzduchem o teplotě  $20\text{ °C}$  volím na základě podobné úlohy v literatuře [27]  $\alpha_p = 7\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Vnitřní průměr izolace je  $d_1 = 20,5 \cdot 10^{-3}\text{ m}$ , vnější průměr izolace je  $d_2 = 49 \cdot 10^{-3}\text{ m}$  a vnější průměr ochranného krytu má hodnotu  $d_3 = 50 \cdot 10^{-3}\text{ m}$ . Součinitel tepelné vodivosti oceli je dle [3]  $\lambda_o = 50\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Výpočet teploty vnějšího povrchu ochranného krytu a tepelných ztrát provádím podle literatury [27].



Obr. 31. Prostup tepla izolací a ochranným krytem [27]

Protože ze zadaných hodnot nemůžu přímo určit střední teplotu izolační vlny, použiji metodu opakovaného výpočtu.

*Předběžné stanovení střední teploty čedičové vlny:*

$$t_{\text{stř}} = \frac{t_{s1} + t_2}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad [27] \quad (17)$$

$$t_{\text{stř}} = \frac{250 + 20}{2} = 135^{\circ}\text{C}$$

*Předběžné stanovení součinitele tepelné vodivosti čedičové vlny:*

$$\lambda_{\xi} = 0,035 + 0,00014 \cdot t_{\text{stř}} \quad [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}] \quad [27] \quad (18)$$

$$\lambda_{\xi} = 0,035 + 0,00014 \cdot 135 = 0,0539 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

*Tepelné ztráty na jeden metr vyhřívaného pouzdra:*

$$q = \frac{\pi \cdot (t_{s1} - t_2)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{\xi}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_o} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_p \cdot d_3}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1}] \quad [27] \quad (19)$$

$$q = \frac{\pi \cdot (250 - 20)}{\frac{1}{2 \cdot 0,0539} \cdot \ln \frac{49 \cdot 10^{-3}}{20,5 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \ln \frac{50 \cdot 10^{-3}}{49 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{7 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}} = 66,043 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

*Teplota povrchu ochranného krytu:*

$$t_{s3} = t_2 + \frac{q}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_p \cdot d_3} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad [27] \quad (20)$$

$$t_{s3} = 20 + \frac{66,043}{\pi} \cdot \frac{1}{7 \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 80,064^{\circ}\text{C}$$

*Teplota mezi izolací a vnitřním povrchem ochranného krytu:*

$$t_{s2} = t_{s1} - \frac{q}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\xi}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \right) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad [27] \quad (21)$$



$$t_{s2} = 250 - \frac{66,043}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 0,0539} \cdot \ln \frac{49 \cdot 10^{-3}}{20,5 \cdot 10^{-3}} \right) = 80,069^{\circ}\text{C}$$

*Druhé předběžné stanovení střední teploty:*

$$t_{\text{stř}} = \frac{t_{s1} + t_{s2}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad [27] \quad (22)$$

$$t_{\text{stř}} = \frac{250 + 80,069}{2} = 165,035^{\circ}\text{C}$$

Výpočet jsem ukončil v okamžiku, kdy rozdíl po sobě jdoucích středních hodnot teploty izolace byl zanedbatelný. V posledním výpočtu jsem získal tyto hodnoty:

*Tabulka 13: Výsledné hodnoty z výpočtu tepelné izolace*

Součinitel tepelné vodivosti izolace $\lambda_{\xi} [Wm^{-1}K^{-1}]$	0,058
Tepelné ztráty na jeden metr vyhřívaného pouzdra $q [Wm^{-1}]$	69,774
Teplota na vnější straně ochranného krytu $t_{s3} [^{\circ}\text{C}]$	83,447
Teplota na vnější straně izolace $t_{s2} [^{\circ}\text{C}]$	83,456
Střední teplota izolace $t_{\text{stř}} [^{\circ}\text{C}]$	166,723

Vypočtená teplota na povrchu ochranného krytu může při delším dotyku způsobit popáleniny. Během provozu zařízení se na ochranný kryt nesmí sahat.

#### **Zjištění celkového tepelného výkonu plastifikační jednotky.**

$$\dot{Q} = \dot{Q}' + q \cdot l \quad [W] \quad (23)$$

$$\dot{Q} = 67,245 + 69,774 \cdot 0,131 = 76,385W \doteq 80 W$$

Kde  $l$  označuje vyhřívanou délku plastifikační jednotky.

## Elektrická izolace

K elektrickému odizolování odporového drátu a povrchu vyhřívaného pouzdra navrhuji papír z flogopitové slídy, která má tepelnou odolnost 900 až 1000 °C. Tento produkt nabízí firma CHHAPERIA a jedná se o typ MPP4 o tloušťce 0,095 mm [28,29].

### 6.3.2 Volba odporového drátu a výpočet jeho teploty

Pro výhřev pouzdra volím odporový drát značky BLOCK, jehož parametry jsou v následující tabulce.

Tabulka 14: Parametry zvoleného odporového drátu [30]

Typ	RD 100/0,10
Průměr drátu [mm]	0,1
Maximální proudové zatížení [A]	0,39
Velikost odporu na jeden metr $\hat{R}$ [ $\Omega$ /m]	62,4

### Výpočet potřebné délky odporového drátu.

Potřebný odpor při napětí  $U=230V$ :

$$R_{dr} = \frac{U^2}{P} \quad [\Omega] \quad [31] \quad (24)$$

$$R_{dr} = \frac{U^2}{\dot{Q}} = \frac{230^2}{80} = 661,25 \Omega$$

Ověření maximálního proudového zatížení:

$$I = \frac{U}{R_{dr}} \quad [A] \quad (25)$$

$$I = \frac{230}{663,25} = 0,348 \text{ A}$$

Maximální proud procházející odporovým drátem nepřekračuje dovolené proudové zatížení.

Potřebná délka odporového drátu:

$$L_{dr} = \frac{R_{dr}}{\dot{R}} \quad [m] \quad (26)$$

$$L_{dr} = \frac{661,25}{62,4} = 10,60 \text{ m}$$

Navinutím potřebné délky odporového drátu na vyhřívanou část pouzdra o délce 131mm a průměru 16,34mm vznikne 207 závitů s roztečí 0,63mm.

### Teplota odporového drátu

Aby měla teplota  $t_{v2}$  na vnitřní straně vyhřívaného pouzdra o průměru  $d_{v1}$  zadanou hodnotu, musí být teplota odporového drátu vyšší. Teplotu vnějšího povrchu pouzdra  $t_{v1}$  uvažuji stejnou jako teplotu odporového drátu, protože odporový drát je s povrchem pouzdra o průměru  $d_{v2}$  v kontaktu a vinutí drátu je husté. Tepelný vliv elektrické izolace zanedbávám kvůli její malé tloušťce. Pro zjištění teploty odporového drátu jsem použil výpočet pro vedení tepla jednoduchou válcovou plochou.

$$\dot{Q}' = \frac{\pi \cdot l \cdot (t_{v1} - t_{v2})}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_o} \cdot \ln \frac{d_{v2}}{d_{v1}}} \quad [W] \quad [26] \quad (27)$$

$$t_{v1} = \frac{\dot{Q}' \cdot \frac{1}{2 \cdot \lambda_o} \cdot \ln \frac{d_{v2}}{d_{v1}}}{\pi \cdot l} + t_{v2} \quad [^{\circ}C] \quad [26] \quad (28)$$

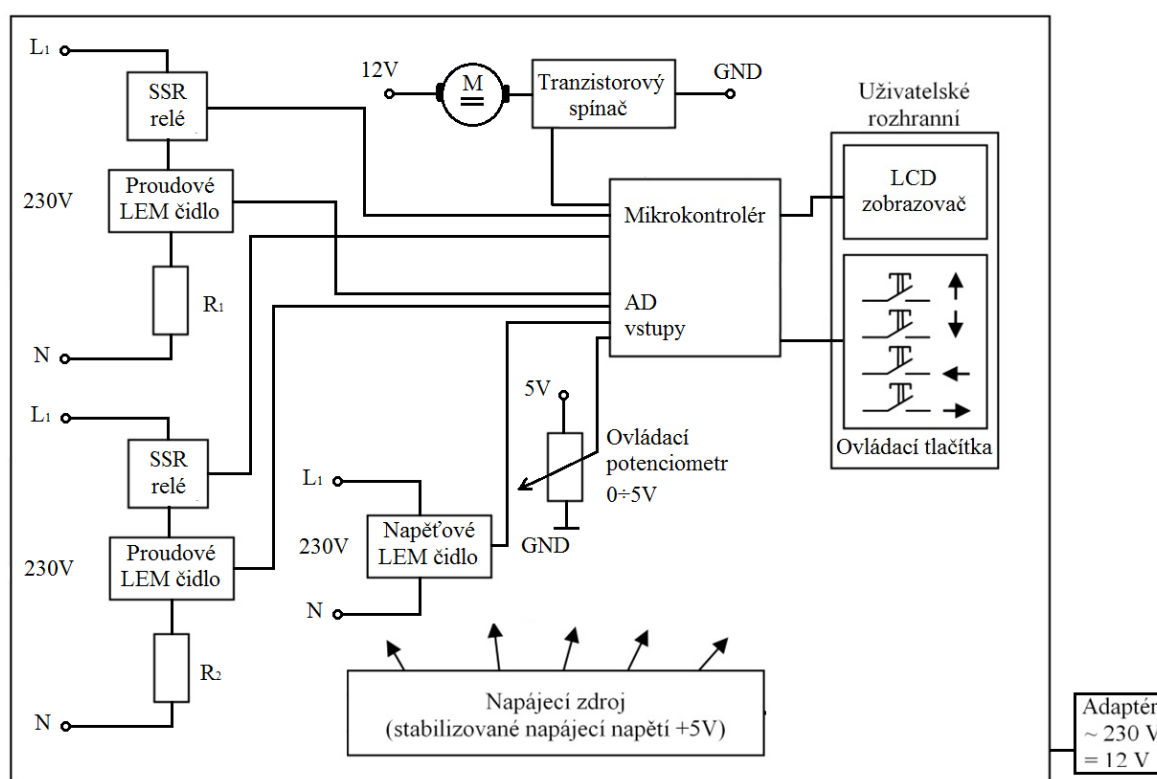
$$t_{v1} = \frac{67,245 \cdot \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \ln \frac{16,15 \cdot 10^{-3}}{15,15 \cdot 10^{-3}}}{\pi \cdot 0,131} + 250 = 250,104^{\circ}C$$

## 6.4 Regulace ohřevu a otáček motoru

Pro regulaci teploty odporového drátu a maximálních otáček motoru pro daný materiál a tloušťku svaru, je vhodné použít přístroj obsahující mikrokontrolér. Tento přístroj musí být schopen na vstupu rozeznat signály z teplotních čidel a rezistorů a na výstupu regulovat napětí nebo ovládat spínací relé.

Jako teplotní čidlo se dá použít odporový drát, který je určen k ohřevu. Musí se však jednat o odporový drát, který s teplotou mění svůj odpor. Do paměti mikrokontroléru se přes počítač uloží tabulky se závislostmi teploty na odporu daného odporového drátu a naprogramuje se požadované rozmezí teplot regulace pro dané materiály. Zařízení obsahující mikrokontrolér poté měří proud procházející odporovým drátem, z čehož počítá odpor drátu v dané chvíli. Pomocí uložených tabulek se závislostmi odporu na teplotě následně stanoví aktuální teplotu odporového drátu a ovládáním relé ji upravuje.

Pro různé materiály je potřeba v mikrokontroléru nastavit různou maximální rychlost otáček motoru. Otáčky jsou ještě dále regulovatelné obsluhou pomocí spouště s potenciometrem a to v rozmezí od nulových otáček po maximální otáčky pro navolený materiál.



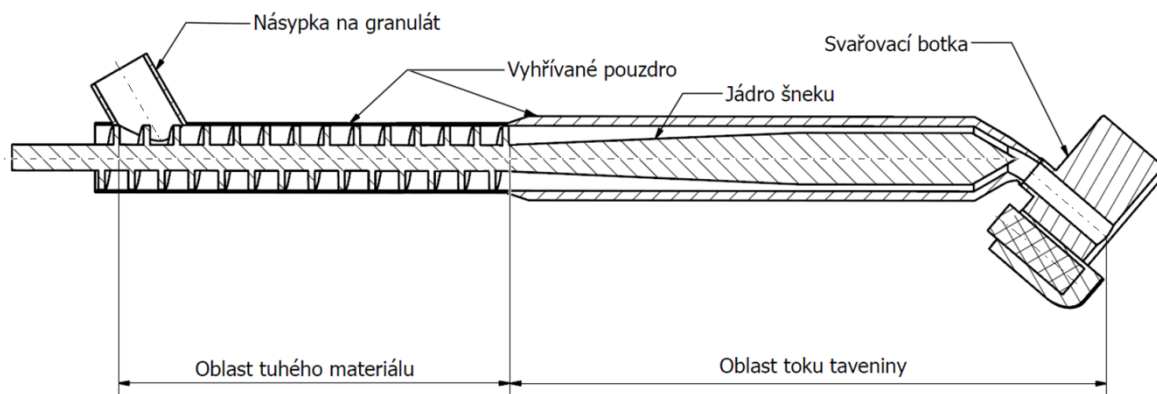
Obr. 32. Blokové schéma regulace ohřevu a otáček motoru

## 6.5 Návrh pohonu

Pro zjištění potřebného výkonu a momentu pro návrh pohonu jsem vytvořil teoretický výpočtový model plastifikační jednotky, který se skládá ze dvou částí.

První část je tvořena dopravní zónou šneku, kde je materiál v tuhém stavu. Potřebný výkon pro pohon této části získám výpočtem pro šnekové dopravníky.

Druhá část výpočtového modelu se skládá z kompresní zóny, dávkovací zóny a trubičky, která vyvádí extrudát z dávkovací zóny přes botku do svarové spáry. V této části uvažuji materiál jako taveninu protékající mezikružím tvořeným hřídelí šneku (bez šnekovnice) a vnitřním povrchem vyhřívaného pouzdra. Jedná se o stejný princip jako při výpočtu změny tlaku v dávkovací zóně, který jsem provedl v kapitole 6.2.1. Výpočtem třecích a místních ztrát vzniklých prouděním taveniny a aplikací Bernoulliho rovnice získám změnu tlaku v druhé části výpočtového modelu. Když vypočítaný tlak vynásobím plochou mezikruží, které je tvořeno průměrem šneku a průměrem jeho hřídele v dopravní zóně, zjistím axiální sílu působící na poslední závit šnekovnice v dopravní zóně šneku. Z vypočtené axiální síly, pak pomocí výpočtu z literatury [32] získám potřebný moment a výkon pro pohon druhé části výpočtového modelu. Po sečtení výkonů první a druhé části výpočtového modelu dostanu celkový výkon a moment pro pohon šneku v plastifikační jednotce.



Obr. 33. Náčrt výpočtového modelu pro návrh pohonu

### 6.5.1 Výpočet první části výpočtového modelu

Pro výpočet výkonu potřebného pro první část výpočtového modelu potřebuji dopravní výkon (hmotnostní průtok materiálu plastifikační jednotkou  $\dot{m}$ ) v  $\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ . Plastifikační jednotka může být maximálně ve vodorovné poloze, proto volím úhel sklonu  $\varepsilon = 0^\circ$ .

Měrný odpor proti pohybu pro dopravovaný materiál ABS jsem nenalezl, proto volím nejvyšší hodnotu z tabulky 6.2 v literatuře [32]  $w = 5$ .

$$P_1 = \frac{\dot{m} \cdot L_{\text{dop}}}{3600} \cdot (w \cdot \cos \varepsilon + \sin \varepsilon) \cdot g \quad [\text{W}] \quad [32] \quad (29)$$

$$P_1 = \frac{0,910 \cdot 0,095}{3600} \cdot 5 \cdot 9,81 = 1,178 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

Kde  $L_{\text{dop}}$  je délka dopravní části šneku.

### 6.5.2 Výpočet druhé části výpočtového modelu

Druhou část výpočtového modelu rozdělím na výpočet ztrátového tlaku v kompresní zóně, v dávkovací zóně a v trubičce, která vyvádí extrudát z dávkovací zóny přes botku do svarové spáry.

#### Výpočet ztrátového tlaku v kompresní zóně.

V kompresní zóně se zvětšuje průměr hřídele šneku a mění se tedy i součinitel tření. Pro výpočet se používá jeho střední hodnota [24]. Při zvětšování průměru jádra se zmenšuje plocha mezikruží, ve které tavenina proudí a měla by se tedy zvyšovat její rychlost. V tomto výpočtovém modelu však uvažuji rychlost proudění taveniny v kompresní zóně stejně velkou jako v zóně dávkovací, protože v kompresní části dochází ke stlačování taveniny (v reálném případě směsi granulátu a taveniny) a hmotnostní průtok je tedy stejný.

*Reynoldsovo číslo pro mezikruží v dopravní zóně:*

$$Re_{\text{dop}} = \frac{v_1 \cdot (D - d_{\text{dop}})}{g} \quad [-] \quad [24] \quad (30)$$

$$Re_{\text{dop}} = \frac{3,806 \cdot 10^{-3} \cdot (0,015 - 0,006)}{0,243} = 1,410 \cdot 10^{-4}$$

Kde  $d_{\text{dop}}$  je průměr hřídele šneku v dopravní zóně.

*Reynoldsovo číslo pro mezikruží v dávkovací zóně:*

Viz výpočet (5).

$$\text{Re}_d = 4,699 \cdot 10^{-5}$$

*Součinitel tření pro mezikruží v dopravní zóně:*

$$\lambda_{\text{dop}} = \frac{64}{\text{Re}_{\text{dop}}} \cdot \frac{\left(1 - \frac{d_{\text{dop}}}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d_{\text{dop}}}{D}\right)^2 + \frac{1 - \left(\frac{d_{\text{dop}}}{D}\right)^2}{\ln \frac{d_{\text{dop}}}{D}}} \quad [-] \quad [24] \quad (31)$$

$$\lambda_{\text{dop}} = \frac{64}{1,410 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{\left(1 - \frac{0,006}{0,015}\right)^2}{1 + \left(\frac{0,006}{0,015}\right)^2 + \frac{1 - \left(\frac{0,006}{0,015}\right)^2}{\ln \frac{0,006}{0,015}}} = 671725,674$$

*Součinitel tření pro mezikruží v dávkovací zóně:*

Viz výpočet (6).

$$\lambda_d = 2041296,838$$

*Střední hodnota součinitele tření pro kompresní zónu:*

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{\text{dop}} + \lambda_d}{2} \quad [-] \quad [33] \quad (32)$$

$$\lambda_s = \frac{671725,674 + 2041296,838}{2} = 1356511,256$$

*Výpočet středního průměru jádra šneku:*

$$d_s = \frac{d_{\text{dop}} + d_d}{2} \quad [\text{m}] \quad (33)$$

$$d_s = \frac{0,006 + 0,012}{2} = 0,009 \text{ m}$$

*Ztrátová výška z tření v kompresní zóně:*

$$h_{tk} = \frac{\lambda_s \cdot L_k}{(D - d_s)} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad [33] \quad (34)$$

$$h_{tk} = \frac{1356511,256 \cdot 0,07}{(0,015 - 0,009)} \cdot \frac{(3,806 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9,81} = 11,684 \text{ m}$$

Kde  $L_k$  je délka kompresní zóny šneku.

*Ztrátová výška z místní ztráty kónickým zúžením v kompresní zóně:*

$$h_{kzk} = \xi_{kzk} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad [34] \quad (35)$$

Kde  $\xi_{kzk}$  je součinitel místní ztráty při kónickém zúžení, který je funkcí úhlu zúžení. V mém případě je úhel zúžení  $4,9^\circ$  pro který je podle literatury [34]  $\xi_{kzk}=0,06$ .

$$h_{kzk} = 0,06 \cdot \frac{(3,806 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9,81} = 4,430 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

*Ztrátový tlak v kompresní zóně:*

$$p_{zk} = g \cdot \rho_{ABS} \cdot (h_{tk} + h_{kzk}) \quad [\text{Pa}] \quad [24] \quad (36)$$

$$p_{zk} = 9,81 \cdot 1070 \cdot (11,684 + 4,430 \cdot 10^{-8}) = 122648,302 \text{ Pa}$$

### **Výpočet ztrátového tlaku v dávkovací zóně.**

Viz kapitulu 6.2.1

$$p_{zd} = 210931,187 \text{ Pa}$$

### **Výpočet ztrátového tlaku v trubičce vedoucí do svarové botky.**

Objemový průtok  $Q$  na konci dávkovací zóny je stejný jako objemový průtok  $Q_t$  v trubičce vedoucí do botky. Výpočet rychlosti v trubičce získám tedy z rovnice kontinuity:

$$Q = Q_t \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad [24] \quad (37)$$

$$Q = S_t \cdot v_2$$



$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_t} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (38)$$

$$v_2 = \frac{2,363 \cdot 10^{-7}}{2,827 \cdot 10^{-5}} = 8,357 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Kde  $S_t$  je plocha průřezu trubičky,  $d_t$  je průměr trubičky a  $v_2$  je rychlost proudění taveniny v trubičce.

Při výpočtu třecí ztráty v trubičce vedoucí do botky připočítávám i délku kónického zúžení na konci dávkovací části plastifikační jednotky. Trubička má menší plochu průřezu než plocha průřezu mezikruží v kónickém zúžení, výsledná hodnota tření v této části bude tedy větší, a proto si toto zjednodušení mohu dovolit.

*Reynoldsovo číslo pro kruhový průřez trubičky:*

$$\text{Re}_t = \frac{v_2 \cdot d_t}{\eta} \quad [-] \quad [24] \quad (39)$$

$$\text{Re}_t = \frac{8,357 \cdot 10^{-3} \cdot 0,006}{0,243} = 2,063 \cdot 10^{-4}$$

*Součinitel tření pro kruhový průřez trubičky:*

$$\lambda_t = \frac{64}{\text{Re}_t} \quad [-] \quad [24] \quad (40)$$

$$\lambda_t = \frac{64}{2,063 \cdot 10^{-4}} = 310159,148$$

Celkovou ztrátovou výšku v trubičce vedoucí do botky počítám jako součet ztrátové výšky třením, ztrátové výšky způsobené místní ztrátou v ohybu trubičky a ztrátové výšky způsobené místní ztrátou v kónickém zúžení na konci dávkovací zóny.

Délka trubičky vedoucí do botky, včetně kónického zúžení na konci dávkovací části je 37,32 mm. Tento rozměr zaokrouhluji na  $L_t = 38$  mm.

*Ztrátová výška z tření v trubičce:*

$$h_{tt} = \frac{\lambda_t \cdot L_t}{d_t} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad [24] \quad (41)$$

$$h_{tt} = \frac{310159,148 \cdot 0,038}{0,006} \cdot \frac{(8,357 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9,81} = 6,992 \text{ m}$$

Ke zjištění místní ztráty na ohybu trubičky vedoucí do botky dle literatury [34] musím určit součinitel místní ztráty pro oblouková kolena  $\xi_{os}$ , který je funkcí úhlu zaoblení kolena a poměru poloměru zaoblení kolena k průměru trubičky. V mém případě pro poměr  $\frac{r_t}{d_t} = \frac{0,036}{0,006} = 6$  odpovídá dle tabulky v literatuře [34] pro drsné potrubí hodnota  $\xi_{os} = 0,18$ .

*Ztrátová výška z místní ztráty v ohybu trubičky:*

$$h_{os} = \xi_{os} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad [34] \quad (42)$$

$$h_{os} = 0,18 \cdot \frac{(8,357 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9,81} = 6,407 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Ke zjištění ztrátové výšky vzniklé místní ztrátou v kónickém zúžení na konci dávkovací části potřebuji součinitel místní ztráty při kónickém zúžení  $\xi_{kzt}$ . Ten je pro úhel  $60^\circ$  v zúžení na konci dávkovací části podle literatury [34] roven  $\xi_{kzt} = 0,32$ .

*Ztrátová výška z místní ztráty kónickým zúžením v trubičce:*

$$h_{kzt} = \xi_{kzt} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad [34] \quad (43)$$

$$h_{kzt} = 0,32 \cdot \frac{(8,357 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9,81} = 1,139 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

*Celková ztrátová výška v trubičce vedoucí do botky:*

$$h_{cz} = h_{tt} + h_{os} + h_{kzt} \quad [\text{m}] \quad (44)$$

$$h_{cz} = 6,992 + 6,407 \cdot 10^{-7} + 1,139 \cdot 10^{-6} = 6,992 \text{ m}$$

Místní ztráty tedy celkovou ztrátovou výšku v trubičce neovlivnili.

Protože se v zúžení na konci dávkovací části plastifikační jednotky mění rychlost, musím pro další výpočet použít Bernoulliho rovnici pro skutečnou tekutinu. Tlak na konci trubičky vedoucí do botky volím  $p_2 = 0,3 \text{ MPa}$ , což je tlak určený k vytvoření svarového spoje v tlakové zóně botky. Tlak  $p_1$  na začátku této trubičky, určený k pokrytí tlakových ztrát získám z výpočtu:

$$\frac{p_1}{\rho_{\text{ABS}}} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho_{\text{ABS}}} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + g \cdot h_{\text{cz}} \quad [24] \quad (45)$$

Pro tento výpočet volím  $h_1 = h_2$

*Tlak na začátku trubičky:*

$$p_1 = \rho_{\text{ABS}} \cdot g \cdot \left( h_{\text{cz}} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} - \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \right) \quad [\text{Pa}] \quad [24] \quad (46)$$

$$p_1 = 1070 \cdot 9,81 \cdot \left( 6,992 + \frac{300000}{1070 \cdot 9,81} + \frac{(8,357 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9,81} - \frac{(3,806 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9,81} \right)$$

$$p_1 = 373392,956 \text{ Pa}$$

*Celkový tlak nutný k překonání všech odporů a tření v druhé části výpočtového modelu:*

$$p_c = p_{\text{zk}} + p_{\text{zd}} + p_1 \quad [\text{Pa}] \quad (47)$$

$$p_c = 122648,302 + 210931,187 + 373392,956 = 706972,445 \text{ Pa}$$

### **Výpočet potřebného výkonu v druhé části výpočtového modelu.**

*Výpočet axiální síly působící na poslední závit šneku v dopravní zóně:*

$$F_a = p_c \cdot S_{\text{dop}} \quad [\text{N}] \quad [32] \quad (48)$$

$$F_a = p_c \cdot \pi \cdot (R^2 - r_{\text{dop}}^2)$$

$$F_a = 706972,445 \cdot \pi \cdot (0,0075^2 - 0,003^2) = 104,943 \text{ N}$$

Kde  $S_{\text{dop}}$  je plocha mezikruží v dopravní zóně šneku.

Z axiální síly působící na poslední závit šneku v dopravní zóně vypočítám podle literatury [32] potřebný krouticí moment a výkon pro návrh pohonu.

*Účinný poloměr šnekovnice:*

$$R_s = (0,7 \div 0,8) \cdot \frac{D}{2} \quad [\text{m}] \quad [32] \quad (49)$$

$$R_s = 0,75 \cdot \frac{0,015}{2} = 0,005625 \text{ m}$$

V literatuře [35] jsem našel součinitel smykového tření za pohybu pro materiál třecích ploch ocel-PVC, který má hodnotu  $\mu_t = 0,6$ . Předpokládám, že tření pro materiál ocel-ABS bude podobné, a proto počítám s touto hodnotou.

*Třecí úhel mezi materiálem a šnekovnicí:*

$$\text{tg} \delta_t = \mu_t \quad [-] \quad (50)$$

$$\text{tg} \delta_t = 0,6$$

$$\delta_t = \text{arctg} 0,6 \quad [^\circ] \quad (51)$$

$$\delta_t = 30,964^\circ$$

*Krouticí moment potřebný pro pohon druhé části výpočtového modelu:*

$$F_a = \frac{M_{K2}}{R_s \cdot \text{tg}(\alpha + \delta_t)} \quad [\text{N}] \quad [32] \quad (52)$$

$$M_{K2} = F_a \cdot R_s \cdot \text{tg}(\alpha + \delta_t) \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad [32] \quad (53)$$

$$M_{K2} = 104,943 \cdot 0,005625 \cdot \text{tg}(8,45 + 30,964) = 0,485 \text{ Nm}$$

*Výkon potřebný pro pohon druhé části výpočtového modelu:*

$$P_2 = M_{K2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad [\text{W}] \quad [32] \quad (54)$$

$$P_2 = 0,485 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1 = 3,048 \text{ W}$$

### 6.5.3 Celkový výkon a krouticí moment

Celkový výkon pohonu šneku získám sečtením dílčích výkonů prvního a druhého výpočtového modelu. Tento výkon musí být ještě podělen celkovou účinností pohonu.

*Teoretický celkový výkon:*

$$P'_c = P_1 + P_2 \quad [\text{W}] \quad (55)$$

$$P'_c = 1,161 \cdot 10^{-3} + 3,048 = 3,049 \text{ W}$$

V mém případě se moment z převodovky spojené s motorkem přenáší přes čelní ozubení na bezpečnostní spojku uloženou ve dvou ložiscích. Účinnost čelního ozubeného soukolí se běžně pohybuje v rozmezí  $\eta_{\text{čO}} = 0,99 \div 0,995$ . Účinnost dobře mazaných ložisek se pohybuje v rozmezí  $\eta_{\text{L}} = 0,995 \div 0,997$ .

*Celková účinnost:*

$$\eta_c = \eta_{\text{čO}} \cdot \eta_{\text{L}}^2 \quad [-] \quad (56)$$

$$\eta_c = 0,99 \cdot 0,995^2 = 0,98$$

*Skutečný celkový výkon:*

$$P_c = (1,15 \div 1,20) \cdot \frac{P'_c}{\eta_c} \quad [\text{W}] \quad [32] \quad (57)$$

$$P_c = 1,20 \cdot \frac{3,049}{0,98} = 3,733 \text{ W}$$

*Celkový krouticí moment:*

$$M_{\text{K,c}} = \frac{P_c}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad [32] \quad (58)$$

$$M_{\text{K,c}} = \frac{3,733}{2 \cdot \pi \cdot 1} = 0,594 \text{ N} \cdot \text{m}$$

## 6.6 Volba pohonu

Z vypočtených hodnot mohu navrhnout pohon, který se skládá z motoru, převodovky, bezpečnostní spojky, dvou ložisek a dvou čelních ozubených kol.

### 6.6.1 Motor

Volím stejnosměrný motor v kompletu s planetovou převodovkou se základními parametry vypsány v následující tabulce.

*Tabulka 15: Parametry stejnosměrného motoru s planetovou převodovkou [36]*

Maximální otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]	64
Výkon [W]	5,18
Krouticí moment [Nm]	2,4
Napětí [V]	12
Celková délka [mm]	68
Největší průměr [mm]	22
Průměr hřídele [mm]	4



*Obr. 34. Stejnosměrný motor s planetovou převodovkou [36]*

### 6.6.2 Spojka

Volím bezpečnostní spojku R+W, model SK2, série 1,5 s nastavitelným momentem rozeptutí v rozmezí  $0,1 \div 1,5 \text{ Nm}$  [37].

Tabulka 16: Parametry bezpečnostní spojky R+W [37]

Délka [mm]	42
Vnější průměr [mm]	24
Průměr díry pro hřídel [mm]	3÷8
Nastavitelný moment [Nm]	0,1÷1,5



Obr. 35. Bezpečnostní spojka R+W [37]

#### Kontrola hřídele šneku na krut.

Jako materiál šneku volím ocel 15230.7 zušlechtěnou na 1000 MPa. Podle literatury [35] je dovolené napětí pro slitinové oceli při míjivém zatěžování krutem  $\tau_{DK} = 210 \div 375$  MPa. Kontrolu provádím pro nejmenší průměr šneku  $d_{dop} = 6$  mm a pro největší moment  $M_{KS} = 1,5$  Nm, který může být nastaven na bezpečnostní spojce.

$$\tau_{DK} \geq \frac{M_{KS}}{W_K} \quad [\text{Pa}] \quad [35] \quad (59)$$

$$\tau_{DK} \geq \frac{16 \cdot M_{KS}}{\pi \cdot d_{dop}^3}$$

$$210 \cdot 10^6 \geq \frac{16 \cdot 1,5}{\pi \cdot (6 \cdot 10^{-3})^3}$$

$$210 \cdot 10^6 > 35,37 \cdot 10^6$$

Kde  $W_K$  Průřezový modul v krutu. Průměr šneku vyhovuje.

### Kontrola hřídele šneku na torzní tuhost.

Torzní tuhost se kontroluje zpravidla u dlouhých tenkých hřídelů, které se z důvodu poddajnosti mohou deformovat a způsobovat torzní kmity vedoucí k nežádoucím vibracím [38].

Hřídel kontroluji pro normální provoz při zatížení momentem  $M_{Kc}$ . Modul pružnosti ve smyku pro ocel je podle [38]  $G = 80 \cdot 10^9$  Pa. Dovolený úhel zkroucení se udává  $\varphi_d = 0,25 \div 0,75^\circ \cdot m^{-1}$  [39].

*Polární moment průřezu:*

$$J_p = \frac{\pi \cdot d_i^4}{32} \quad [m^4] \quad [38] \quad (60)$$

*Polární moment průřezu pro hřídel v dopravní zóně:*

$$J_{p1} = \frac{\pi \cdot d_{dop}^4}{32} \quad [m^4] \quad [38] \quad (61)$$

$$J_{p1} = \frac{\pi \cdot 0,006^4}{32} = 1,272 \cdot 10^{-10} m^4$$

*Polární moment průřezu pro hřídel v kompresní zóně:*

$$J_{p2} = \frac{\pi \cdot d_s^4}{32} \quad [m^4] \quad [38] \quad (62)$$

$$J_{p2} = \frac{\pi \cdot 0,009^4}{32} = 6,441 \cdot 10^{-10} m^4$$

*Polární moment průřezu pro hřídel v dávkovací zóně:*

$$J_{p3} = \frac{\pi \cdot d_d^4}{32} \quad [m^4] \quad [38] \quad (63)$$

$$J_{p3} = \frac{\pi \cdot 0,012^4}{32} = 2,036 \cdot 10^{-9} m^4$$



Úhel zkroucení hřídele plastifikačního šneku:

$$\varphi = \frac{180 \cdot M_{K,c}}{\pi \cdot G} \cdot \left( \frac{L_z}{J_{p1}} + \frac{L_k}{J_{p2}} + \frac{L_d}{J_{p3}} \right) \quad [^\circ] \quad [38] \quad (64)$$

$$\varphi = \frac{180 \cdot 0,594}{\pi \cdot 80 \cdot 10^9} \cdot \left( \frac{0,105}{1,272 \cdot 10^{-10}} + \frac{0,070}{6,441 \cdot 10^{-10}} + \frac{0,040}{2,036 \cdot 10^{-9}} \right) = 0,406^\circ$$

Kde  $L_z$  je délka plastifikačního šneku od vetknutí po konec dopravní zóny

Dovolený úhel zkroucení je udáván na metr délky hřídele. Je tedy třeba ho přepočítat na délku šneku od vetknutí po konec jeho činné části. Přepočítaný dovolený úhel zkroucení jsem označil  $\varphi_{dL}$ .

$$\varphi_{dL} = \varphi_d \cdot (L_z + L_k + L_d) \quad [^\circ] \quad (65)$$

$$\varphi_{dL} = 0,75 \cdot (0,105 + 0,070 + 0,040) = 0,161^\circ$$

$$\varphi > \varphi_{dL}$$

Z tohoto porovnání je patrné, že vypočítaný úhel zkroucení hřídele šneku je nepatrně větší než dovolený úhel zkroucení. Výpočet uvažuje s vetknutím hřídele na jednom konci a zatížením silovou dvojicí na druhém konci. Ve skutečnosti však bude úhel zkroucení šneku menší, protože plastifikační šnek je zatížen momentem nerovnoměrně po celé své činné délce. Vzhledem k funkci plastifikačního šneku nepředpokládám omezení funkce přístroje nebo vznik vibrací.

### 6.6.3 Ložiska

Ložiska jsou zatěžována pouze axiální silou, která má velikost 105 N. Vzhledem k takto malé síle mohu navrhnout jednořadá kuličková ložiska. Společnost SKF ve svém katalogu [40] uvádí maximální axiální zatížitelnost pro jednořadá kuličková ložiska do průměru díry 12 mm jako  $0,25 \cdot C_0$ , kde  $C_0$  označuje statickou únosnost ložiska.

*Tabulka 17: Rozměry a dovolená zatížení zvolených ložisek [40]*

Průměr díry [mm]	10
Vnější průměr [mm]	19
Šířka ložiska [mm]	5
Statická únosnost [N]	585
Maximální axiální zatížení [N]	146,25

#### **6.6.4 Ozubená kola**

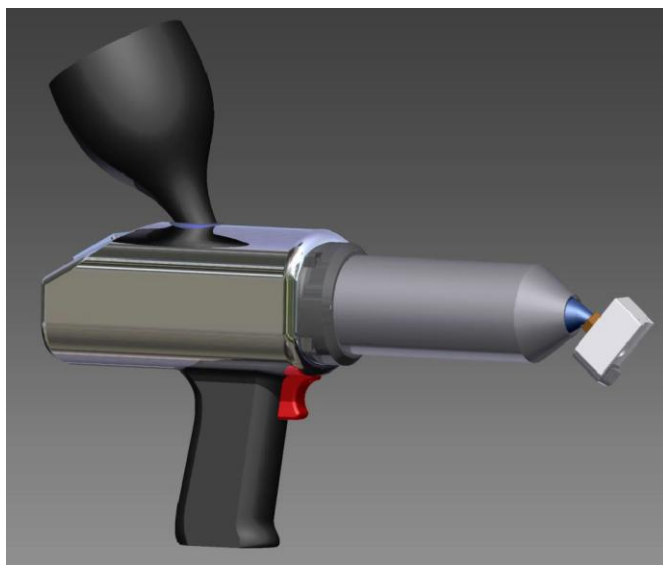
Ozubená kola zajišťují přenos krouticího momentu z převodovky motorku na bezpečnostní spojku. Protože ozubená kola krouticí moment pouze přenášejí, jejich roztečný průměr je stejný. Volím ozubená kola s nábojem firmy SDP/SI [41].

*Tabulka 18: Rozměry zvolených ozubených kol [41]*

Roztečný průměr [mm]	25
Šířka kola [mm]	2
Šířka náboje [mm]	5
Modul [mm]	0,5

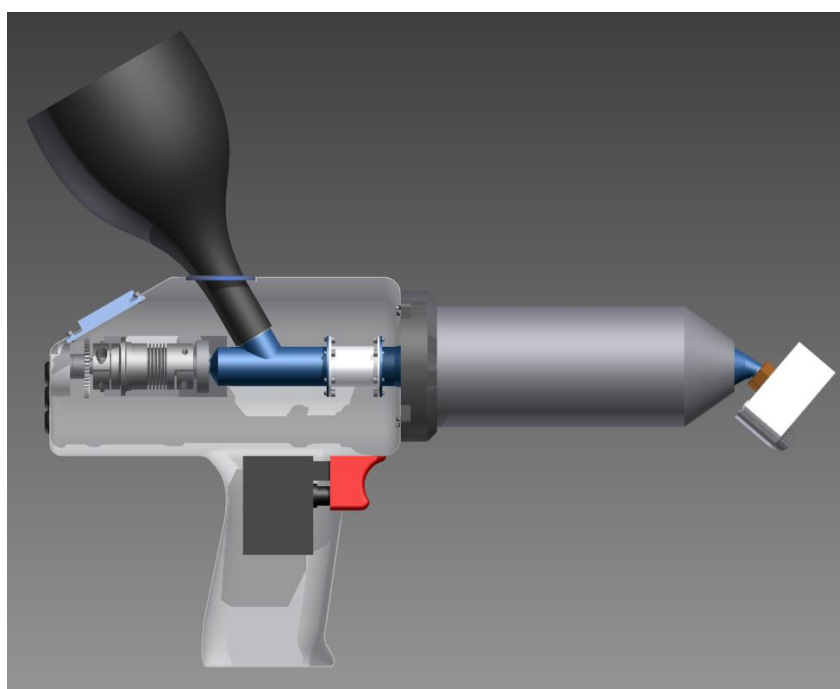
## 7 Úplná stavební struktura

Zobrazení navrženého zařízení, včetně návrhu vnějších tvarů a vzhledu pomocí software Autodesk Inventor Professional 2012.



*Obr. 36. Zobrazení navrženého zařízení*

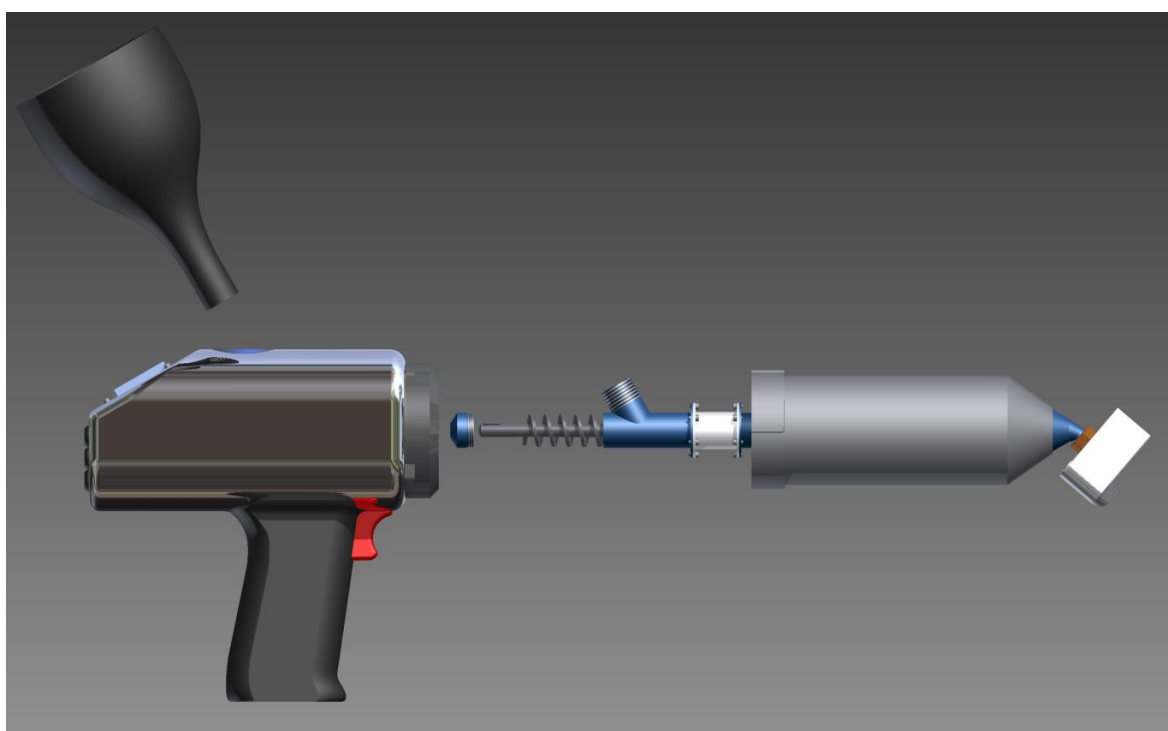
Na následujícím obrázku je znázorněn pohon uvnitř těla zařízení. Můžeme si také povšimnout tepelného oddělení plastifikační jednotky.



*Obr. 37. Zobrazení pohonu zařízení*

## 7.1 Údržba

Zařízení se dá jednoduše a rychle rozebrat v případě údržby a čištění plastifikační jednotky. Nejprve je nutné povolit zásobník na granulát a vytáhnout jej z těla zařízení, poté se povolí ochranný kryt, který je k tělu připevněn na principu bajonetového závitu. Po povolení krytu je možné vytáhnout plastifikační jednotku i s krytem ven z těla. Následuje odšroubování víčka, které brání vniknutí plastového materiálu do těla zařízení a vytáhnutí šneku z vyhřívaného pouzdra. Botka je k vyhřívanému pouzdru připevněna převlečnou maticí.



*Obr. 38. Demontáž plastifikační jednotky v případě údržby a čištění*

## 8 Závěr

V této práci jsem navrhnul zařízení na svařování termoplastů, které splňuje všechny zadané požadavky. Nejdříve jsem udělal literární a patentovou rešerši a zjistil, že požadované zařízení daných vlastností zatím nebylo navrženo. Po nastudování dané problematiky a provedení potřebných výpočtů se mi podařilo navrhnout vytlačovací zařízení pro svařování termoplastů fungující na principu odporového vyhřívání základního i přídatného materiálu.

Toto zařízení je srovnatelné s nejmenšími ručními extrudéry, které používají k tavení základního materiálu horký vzduch. Oproti těmto zařízením má mé řešení řadu důležitých výhod.

Výhody oproti současným ručním extrudérům:

- menší oxidace materiálu
- menší tepelně ovlivněná oblast
- menší vnitřní pnutí
- menší spotřeba elektrické energie
- svařováním kondukcí lze dosáhnout až 100% pevnosti původního materiálu [2]
- příjemnější úhel držení zařízení při svařování
- menší rozměry a hmotnost
- svařování jednou rukou
- pro jeden typ svaru se nemusí měnit svařovací botka
- snadná údržba

*Tabulka 19: Technické parametry navrženého zařízení*

Připojení na elektrickou síť [V]	230
Topný výkon plastifikační jednotky [W]	80

Topný výkon odporového tělíska v nosu botky [W]	140
Celkový přibližný výkon zařízení [W]	250
Rozměry [mm]	335 x 262 x 76
Průměr granulátu max. [mm]	1,25
Vytlačovací výkon [kg · hod <sup>-1</sup> ]	0,91
Přibližná hmotnost bez kabelu [kg]	1,1

### **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Dr. Ing. Ladislavu Kovářovi za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji Ing. Romanu Hrbáčovi, Ph.D. za rady a konzultace v oblasti elektrotechnické stránky zařízení.

## 9 Seznam použité literatury

[1] *Titan - Multiplast* [online]. 2012 [cit. 2012-5-3]. Svařování horkým vzduchem.

Dostupné z WWW:

< <http://www.titan-multiplast.cz/produkty/svarovani-horkym-vzduchem-52/>>.

[2] LENFELD,P. *Zpracování plastů* (podklad pro výuku předmětu TECHNOLOGIE II – zpracování plastů). [online]. 2012[cit. 2012-5-3]. Dostupné z WWW:

< [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/obsah\\_plasty.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm)>.

[3] LOYDA,M., ŠPONER,V., ONDÁČEK,L., aj. *Svařování termoplastů*. 1. vyd. Praha: uno, 2001. ISBN 80-238-6603-6.

[4] *Podlahové krytiny* [online]. 2012 [cit. 2012-5-3]. Riva . Dostupné z WWW:

<<http://www.riva.cz/cz/eshop/detail.php?z=leister-triac-bt-sada-v-kufriku-2726>>.

[5] Leister Triac BT produktový list. In *TRIAC BT manuál CZ SK* [online]. WELDPLAST ČR s.r.o. : WELDPLAST ČR s.r.o., 2012 [cit. 2012-5-4]. Dostupné z WWW:

<[http://www.weldplast.cz/wp-content/uploads/Triac\\_BT-produktovy-list.pdf](http://www.weldplast.cz/wp-content/uploads/Triac_BT-produktovy-list.pdf)>.

[6] *Stroje-nastroje.eu* [online]. 2012 [cit. 2012-5-4]. Stroje - nástroje. Dostupné z WWW:

<<http://www.stroje-nastroje.eu/seznam.php3?sid=1f8ac0a00447cd0e45f2037348f0a215&podkategorie=91&l=cz>>.

[7] *Titan - Multiplast* [online]. 2012 [cit. 2012-5-4]. Extruzní svařování. Dostupné z WWW: <<http://www.titan-multiplast.cz/produkty/extruzni-svarovani-53/>>.

[8] *Titan - Multiplast* [online]. 2012 [cit. 2012-5-4]. EXWELD Mini. Dostupné z WWW:

<<http://www.titan-multiplast.cz/produkty/extruzni-svarovani-53/exweld-mini-43/>>.

[9] Polytrade. Cennik : URZĄDZENIA FIRMY „WEGENER. In *Urządzenia firmy "WEGENER"* [online]. 2005 [cit. 2012-5-4]. Dostupné z WWW:

<<http://polytrade.pl/files/cenniki/wegener.pdf>>.



- [10] Nux s.r.o. *DT Dytron : Zařízení pro svařování plastů* [online]. 2011 [cit. 2012-5-6]. Svařování desek a fólií. Dostupné z WWW: <<http://dytron.eu/katalog/svarovani-desek-a-folii/#prislus-detail>>.
- [11] *Úřad průmyslového vlastnictví - databáze* [online]. 2012 [cit. 2012-5-6]. Dostupné z WWW: <<http://www.upv.cz/cs/sluzby-uradu/database-on-line.html>>.
- [12] *Espacenet Patent Search* [online]. 2012 [cit. 2012-5-6]. Dostupné z WWW: <<http://worldwide.espacenet.com>>.
- [13] HUBKA, V. *Konstrukční nauka, obecný model postupu při konstruování*. 2. vyd. Zurich: HEURISTA, 1995. 103 s.
- [14] *EPP Plasty a. s.* [online]. 2012 [cit. 2012-5-8]. Dostupné z WWW: <<http://www.eppplasty.cz/ptfe.htm>>.
- [15] KUTA, A. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. 1. vyd. Praha: VŠCHT Praha, 1999. 203 s. ISBN 80-7080-367-3.
- [16] BĚHÁLEK, L. *Princip vstřikování* [online]. 2011 [cit. 2012-5-8]. Dostupné z WWW: <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/tzn/c8/vstrikovani.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c8/vstrikovani.pdf)>.
- [17] *Vytlačování* [online]. 2012 [cit. 2012-5-8]. Dostupné z WWW: <[http://web.ft.utb.cz/cs/docs/3.\\_Vytla\\_\\_ov\\_\\_n\\_\\_.pdf](http://web.ft.utb.cz/cs/docs/3._Vytla__ov__n__.pdf)>.
- [18] WOMER, W.T. *The Basic sof Good Extrusion Screw Design* [online]. 2012 [cit. 2012-5-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.spirex.com/media/doc/The%20Basics%20of%20Good%20Extrusion%20Screw%20Design.pdf>>.
- [19] NARANJO, C; NORIEGA, P; SIERRA, M; SANZ, J. *Extrusion Processing Data* München :Carl Hanser, 2001. 128 s. ISBN 978-3-446-21694-5
- [20] *Wiman Corporation Datasheets* [online]. Sauk Rapids (Minnesota, U.S.A.), 2012 [cit. 2012-5-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.wimancorp.com/gravitychart.html>>.

- [21] BEYLER, L.C.; HIRSCHLER, M.M. *Thermal Decomposition of Polymers* [online]. 2012 [cit. 2012-5-15]. Dostupné z WWW: <[http://gbhint.tripod.com/papers\\_5\\_13\\_02/368\\_Beyler\\_Hirschler\\_SFPE\\_Handbook\\_3.pdf](http://gbhint.tripod.com/papers_5_13_02/368_Beyler_Hirschler_SFPE_Handbook_3.pdf)>.
- [22] GARCÍA, M.; VAN VLIET, G.; JAIN, S.; SCHRAUWEN, B.A.G.; SARKISSOV, A.; VAN ZYL, W.E.; BOUKAMP, B. *POLYPROPYLENE/SiO<sub>2</sub> NANOCOMPOSITES WITH IMPROVED MECHANICAL PROPERTIES* [online]. 2004 [cit. 2012-5-15]. Dostupné z WWW: <[http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no\\_2604/garcia/garcia.pdf](http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_2604/garcia/garcia.pdf)>.
- [23] WACHARAWICHANANT, S. *THE PHYSICAL BASIC OF POLYMER PROCESSING* [online]. 2012 [cit. 2012-5-15]. Dostupné z WWW: <[http://www.eng.su.ac.th/che/old53/faculty\\_and\\_staff/sirirat/slide\\_polymer\\_processing53\\_pdf/PP\\_3.pdf](http://www.eng.su.ac.th/che/old53/faculty_and_staff/sirirat/slide_polymer_processing53_pdf/PP_3.pdf)>.
- [24] DRÁBKOVÁ, S. *Mechanika tekutin* (učební text). 1. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 257 s. ISBN 978-80-248-1508-4
- [25] *Omega Engineering, Inc.* [online]. 2011 [cit. 2012-5-16]. Dostupné z WWW: <[http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=CIR\\_14&nav=head01](http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=CIR_14&nav=head01)>.
- [26] JUREČKA, P. *Proudění a sdílení tepla*. 1. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2006. ISBN 80-248-1083-2.
- [27] KADLEC, Z. *Sdílení tepla*. 1. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2006.
- [28] *MINELCO* [online]. 2012 [cit. 2012-5-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.minelco.com/en/Products-applications/Minerals/Phlogopite-Mica/>>.
- [29] *CHHAPERIA MICA PRODUCT* [online]. 2007 [cit. 2012-5-17]. Dostupné z WWW: <[http://www.micagroup.net/inner\\_pages/phlogopite.html](http://www.micagroup.net/inner_pages/phlogopite.html)>.
- [30] *GES ELECTRONICS* [online]. 2012 [cit. 2012-5-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.ges.cz/cz/kabely-vodice/draty/draty-odporove/XEAD.html>>.

- [31] Rezistor. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2012-5-17]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistor>>.
- [32] POLÁK,J.; BAILOTTI,K.; PAVLISKA,J.; HRABOVSKÝ,L. *DOPRAVNÍ A MANIPULAČNÍ ZAŘÍZENÍ II*. 1. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2003. 104 s.
- [33] DRÁBKOVÁ,S.; KOZUBKOVÁ,M. Cvičení z *mechaniky tekutin* (učební text). 1. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2004. 27 s.
- [34] *Proudění v potrubí* [online]. Praha, 2012 [cit. 2012-5-17]. Dostupné z WWW: <[http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/prednasky/HY2V\\_04\\_Hydraulika\\_potrubí.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubí.pdf)>.
- [35] LEINVEBER,J.; ŘASA,J.; VÁVRA,P. *Strojnické tabulky*. 3. vyd. Praha: Scienta, 1999. ISBN 80-7183-164-6.
- [36] *Lynxmotion* [online]. 2010 [cit. 2012-5-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.lynxmotion.com/p-580-planetary-gear-motor-120vdc-2311-64rpm-4mm-shaft.aspx>>.
- [37] *Torque limiters* [online]. 2012 [cit. 2012-5-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.rem-technik.cz/files/files/320/r-w-sk-spojky-prehled-en.pdf>>.
- [38] DOLEŽÍ,V.; GALIS,D. *Mechanika II, výukový manuál*. 1. vyd. Opava 2009.
- [39] VYBÍRAL,B. *Mechanika pružného tělesa* [online]. 2012 [cit. 2012-5-17]. Dostupné z WWW: <<http://fyzikalniolympiada.cz/texty/pruznost.pdf>>.
- [40] *SKF-katalog kuličkových ložisek* [online]. 2012 [cit. 2012-5-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.exvalos.cz/katalog-lozisek-skf/>>.
- [41] *SDP/SI* [online]. 2012 [cit. 2012-5-17]. Dostupné z WWW: <<https://sdp-si.com/eStore/Direct.asp?GroupID=591>>.